UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DOUTORADO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE DA
ASSOCIAÇÃO PLENA EM REDE DAS INSTITUIÇÕES

Rodrigus Oliveira Feitosa

GEOINFORMÁTICA APLICADA NA ESTIMATIVA DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO SEMIÁRIDO SERGIPANO

São Cristóvão - Sergipe

2022

Rodrigus Oliveira Feitosa

GEOINFORMÁTICA APLICADA NA ESTIMATIVA DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO SEMIÁRIDO SERGIPANO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe, com vistas à obtenção do título de doutor.

Universidade Federal de Sergipe - UFS

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - DDMA

Orientador: Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza

São Cristóvão - Sergipe

2022

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

F311g

Feitosa, Rodrigus Oliveira.
Geoinformática aplicada na estimativa do potencial fotovoltaico do semiárido sergipano / Rodrigus Oliveira Feitosa; orientador Roberto Rodrigues de Souza. – São Cristóvão, SE, 2022.
149 f.; il.

Tese (doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Energia elétrica. 2. Engenharia geotécnica. 3. Energias - Fontes alternativas. 4. Geração de energia fotovoltaica. 5. . I. Souza, Roberto Rodrigues de, orient. II.Título.

CDU 620.92:004

Rodrigus Oliveira Feitosa

GEOINFORMÁTICA APLICADA NA ESTIMATIVA DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DO SEMIÁRIDO SERGIPANO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe, com vistas à obtenção do título de doutor.

Trabalho aprovado. São Cristóvão - Sergipe, 22 de fevereiro de 2022:

Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza
Orientador

Prof. Dr. Inajá Francisco de Souza
PRODEMA-UFS

Profa. Dra. Maria José Nascimento Soares
PRODEMA-UFS

Prof. Dr. André Quintão de Almeida
PRORH-UFS

Prof. Dr. Marcos Antônio Tavares Lira
PRODEMA-UFPI

São Cristóvão - Sergipe
2022

Dedico este trabalho aos meus pais que trabalharam para me deixar a herança mais importante de todas, a educação.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço meus pais pelas horas de trabalho, dedicação e atenção voltadas à minha educação. Ao meu pai pela lição de que a educação e o trabalho é o único caminho para a realização de meus objetivos e sucesso pessoal. E à minha mãe pelas incansáveis horas cuidando de mim e de minha educação. Hoje que sou pai entendo cada ensinamento recebido.

Aos meus irmãos Dr. André e Me. Henrique pelos incentivos a buscar os mais altos graus de aprendizado, pois também entendem o valor da educação.

Agradeço especialmente a minha esposa, Lidiane, que me incentivou, apoiou e acompanhou cada momento de preocupação, cansaço e sucesso na busca de minha evolução pessoal.

Aos meus filhos, Rafael e Guilherme, por serem minha motivação diária para nunca desistir de meus objetivos, sabendo que a cada degrau que subo, eles estarão me seguindo.

Ao Professor Roberto Rodrigues de Souza, meu orientador desde o mestrado, sempre recebendo com empolgação e interesse minhas ideias de pesquisa, contribuindo determinantemente para o sucesso deste trabalho e para a ciência.

Aos Professores Inajá Francisco e André Quintão da UFS, e Marcos Lira da UFPI pelas orientações e contribuições ao longo desta pesquisa que enriqueceram fortemente este trabalho científico.

Aos integrantes do PRODEMA da UFS pelo esforço e dedicação na manutenção do trabalho prestado aos discentes e à sociedade sergipana, garantindo um alto grau de excelência ao programa. Em especial à Professora Maria José que por tantos anos coordenou este programa de forma exemplar.

À UFS e sua Superintendência de Tecnologia da Informação pela possibilidade de me dedicar integralmente à realização do meu curso de doutorado, em especial aos meus colegas da Coordenação de Redes.

Resumo

O desenvolvimento da sociedade sempre demandou uma crescente necessidade de energia, e nos tempos modernos a preocupação ambiental agrega à essa demanda o uso de fontes mais limpas e renováveis. O Brasil possui grande disponibilidade de recursos renováveis, principalmente o sol. Estudos mostraram que o potencial energético solar brasileiro, especialmente na região semiárida, supera o potencial médio de toda a Europa. Para a análise do potencial solar em uma região, é necessária a aplicação de tecnologias caras e que, devido à extensão do semiárido, seriam financeiramente inviáveis. Porém algumas metodologias aplicadas sobre produtos de sensoriamento remoto podem reduzir esse problema de forma bastante significativa. Levantamos a hipótese de que fosse possível aplicar recursos da geoinformática para estimar o potencial de geração de energia solar no semiárido sergipano, e com isso produzir dados e informações úteis para analisar os impactos ambientais, energéticos e socioeconômicos na região mais pobre do Brasil. Assim, definimos como objetivo geral, analisar o potencial de geração de energia elétrica fotovoltaica (FV) no semiárido sergipano utilizando recursos da geoinformática. Destarte, realizamos a determinação dos parâmetros para modelagem da radiação solar por um Sistema de Informações Geográficas (SIG); desenvolvemos um algoritmo em linguagem computacional para automatizar a modelagem; modelamos a radiação solar; analisamos os locais ideais para instalação de centrais fotovoltaicas; calculamos o potencial de geração elétrica das centrais fotovoltaicas; e, por fim, avaliamos os impactos da entrada da fonte solar de energia elétrica no semiárido sergipano. A metodologia aplicada utilizou principalmente imagens de satélites de alta resolução e o módulo de análise solar r.sun do SIG GRASS. A análise dos locais ideais foi baseada num método do processo de análise hierárquica e na análise de sobreposição ponderada. Os resultados mostram que o potencial do semiárido sergipano é superior aos dados obtidos em outro estudo realizado a nível nacional e que isso poderia representar um grande impacto à população local. Observamos que o uso de produtos de sensoriamento remoto com melhor resolução e um estudo à nível regional ou local produz resultados muito mais acurados, bem como o uso de dados históricos tem suma importância para analisar as variações temporais da radiação solar e das alterações no terreno. O potencial FV médio apurado está entre 5,16 e 5,78 kWh/m^2/dia, e o impacto energético para Sergipe seria muito significativo. O impacto ambiental é considerável desde que a energia FV gerada seja suficiente para evitar o acionamento das termoelétricas. E o impacto social existiria significativamente somente com a implementação de uma cadeia produtiva da energia FV.

Palavras-chaves: energia renovável. fotovoltaica. geotecnologia. semiárido.

Abstract

The development of society has always demanded a growing need for energy, and in modern times environmental concern adds to this demand the use of cleaner and renewable sources. Brazil has great availability of renewable resources, mainly the sun. Studies have shown that Brazilian solar energy potential, especially on semi-arid region, exceeds the average potential of the whole Europe. To analyze the solar potential in a region, it is necessary to apply expensive technologies that, due to extension of semi-arid region, would be financially unfeasible. However, some methodologies applied on remote sensing products can significantly reduce this problem. We hypothesized that it would be possible to apply geoinformatics resources to estimate the potential for solar energy generation on semi-arid region of Sergipe, and thus produce useful data and information to analyze the environmental, energy and socioeconomic impacts on the poorest region of Brazil. Thus, we defined as a general objective, to analyze the potential of photovoltaic (PV) electric energy generation on semi-arid region of Sergipe using geoinformatics resources. Thus, we performed the determination of parameters for modeling solar radiation by a GIS; we developed an algorithm in computational language to automate the modeling; we model solar radiation; we analyze the ideal locations for installing photovoltaic plants; we calculate the electricity generation potential of photovoltaic plants; and, finally, we evaluated the impacts of the entry of the solar source of electric energy in the semi-arid region of Sergipe. The applied methodology mainly used high resolution satellite images and the r.sun solar analysis module of the GRASS SIG. The analysis of ideal locations was based on a process hierarchical analysis method and weighted overlap analysis. Results show that the potential of semi-arid region of Sergipe is superior to data obtained in another study carried out at national level and this could have a great impact on local population. We observed that the use of remote sensing products with better resolution and a study on regional or local level produces much more accurate results, as well as use of historical data is of paramount importance to analyze the temporal variations of solar radiation and changes in the terrain. The average PV potential calculated is between 5.16 and 5.78 $kWh/m^2/day$, and the energy impact for Sergipe would be very significant. The environmental impact is considerable as long as PV energy generated is sufficient to prevent activation of thermoelectric plants. And social impact would only exist significantly with implementation of a productive chain of PV energy.

Key-words: renewable energy. photovoltaic. geotechnology. semiarid.

Resumen

El desarrollo de la sociedad siempre ha demandado una creciente necesidad de energía, y en los tiempos modernos, las preocupaciones ambientales se suman a esta demanda por el uso de fuentes más limpias y renovables. Brasil tiene una gran disponibilidad de recursos renovables, principalmente el sol. Los estudios han demostrado que el potencial de energía solar de Brasil, especialmente en la región semiárida, supera el potencial medio de toda Europa. Para analizar el potencial solar de una región es necesario aplicar tecnologías costosas que, por la extensión del semiárido, serían financieramente inviables. Sin embargo, algunas metodologías aplicadas en productos de teledetección pueden reducir significativamente este problema. Presumimos que sería posible aplicar recursos geoinformáticos para estimar el potencial de generación de energía solar en la región semiárida de Sergipe, y así producir datos e información útiles para analizar los impactos ambientales, energéticos y socioeconómicos en la región más pobre de Brasil. Así, definimos como objetivo general, analizar el potencial de generación de energía eléctrica fotovoltaica (FV) en la región semiárida de Sergipe utilizando recursos geoinformáticos. Así, realizamos la determinación de parámetros para modelar la radiación solar mediante un SIG; desarrollamos un algoritmo en lenguaje computacional para automatizar el modelado; modelamos la radiación solar; analizamos las ubicaciones idóneas para la instalación de plantas fotovoltaicas; calculamos el potencial de generación eléctrica de las plantas fotovoltaicas; y, finalmente, evaluamos los impactos de la entrada de la fuente solar de energía eléctrica en la región semiárida de Sergipe. La metodología aplicada utilizó principalmente imágenes de satélite de alta resolución y el módulo de análisis solar r.sun de SIG GRASS. El análisis de las ubicaciones ideales se basó en un método de análisis jerárquico de procesos y un análisis de superposición ponderada. Los resultados muestran que el potencial de la región semiárida de Sergipe es superior a los datos obtenidos en otro estudio realizado a nivel nacional y que esto podría tener un gran impacto en la población local. Observamos que el uso de productos de teledetección con mejor resolución y un estudio a nivel regional o local produce resultados mucho más precisos, así como el uso de datos históricos es de suma importancia para analizar las variaciones temporales de la radiación solar y los cambios en el terreno. El potencial fotovoltaico promedio calculado está entre 5,16 y 5,78 kWh/m^2/día, y el impacto energético para Sergipe sería muy significativo. El impacto ambiental es considerable siempre que la energía fotovoltaica generada sea suficiente para evitar la activación de las plantas termoeléctricas. Y el impacto social solo existiría significativamente con la implementación de una cadena productiva de energía fotovoltaica.

Palabras-clave: energías renovables. fotovoltaica geotecnología. semi árido.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Matriz Elétrica 2020, ano base 2019. 35
Figura 2 – Empreendimentos FV vencedores nos leilões de energia de 2014 a 2018. 36
Figura 3 – Custo de investimento declarado em Reais nos leilões para projetos FV. 37
Figura 4 – Custo de investimento declarado em Dólares nos leilões para projetos FV. 37
Figura 5 – Preços médios por leilão de 2014 a 2018. 38
Figura 6 – Variabilidade das médias anuais dos totais diários de irradiação global ao longo dos anos de 2005 a 2015 para cada uma das regiões do Brasil (kWh/m^2/dia). 41
Figura 7 – Radiação global média anual no semiárido sergipano. 44

Figura 8 – Exemplo de mapa raster. 53
Figura 9 – Exemplo de mapa vetorial. 54

Figura 10 – Mapa da área de estudos 70
Figura 11 – Fluxograma do algoritmo. 75
Figura 12 – Diagrama de processos para modelagem. 76
Figura 13 – Critérios para mapeamento dos locais ideais. 79
Figura 14 – Projeção da sombra S, de um objeto com altura h 85
Figura 15 – Trigonometria no triângulo retângulo 85
Figura 16 – Vista lateral do arranjo FV 86
Figura 17 – Estações meteorológicas automáticas mais próximas da área de estudos. 90

Figura 18 – Imagens LANDSAT 8 do semiárido sergipano no período seco 94
Figura 19 – Imagens LANDSAT 8 do semiárido sergipano no período chuvoso . . . 95
Figura 20 – Procedimento de mascaramento de nuvens em imagens de satélite . . . 95
Figura 21 – MDE do semiárido sergipano 96
Figura 22 – Albedo da superfície 97
Figura 23 – Histograma do albedo da superfície 97
Figura 24 – TL no semiárido sergipano 98
Figura 25 – Variação do TL no semiárido sergipano 99
Figura 26 – Mapa de radiação global média (1º Semestre) 101
Figura 27 – Mapa de radiação global média (2º Semestre) 102
Figura 28 – Radiação global média 103
Figura 29 – Radiação global e pluviosidade média no semiárido sergipano 104
Figura 30 – Mapa da radiação global média anual 105
Figura 31 – Comparação da radiação global modelada e do ABES 106

Figura 32 – Mapa de disponibilidade de áreas para usinas FV 107
Figura 33 – Mapa de radiação global reclassificado 109
Figura 34 – Mapa de declividade reclassificado 110
Figura 35 – Mapa de ASD 110
Figura 36 – Mapa de proximidade de linhas de transmissão 111
Figura 37 – Mapa de proximidade de vias de transporte 111
Figura 38 – Mapa de proximidade de áreas urbanas 112
Figura 39 – Mapa dos locais ideais para usinas FV 114
Figura 40 – Consumo x unid. consumidoras x geração elétrica em Sergipe. 117
Figura 41 – Resultados leilões de energia em 2019 122

Lista de tabelas

Tabela 1 – Pontos de coleta do TL 74
Tabela 2 – Dados de TL do Projeto SoDa 74

Tabela 3 – Métricas de avaliação da radiação 106
Tabela 4 – Área disponível para sistemas FV no semiárido sergipano. 108
Tabela 5 – Tabela hierárquica de decisões 113
Tabela 6 – Potencial de geração FV no semiárido sergipano - TWh/ano. 115
Tabela 7 – Potencial FV por município do semiárido sergipano - TWh/ano 116
Tabela 8 – Geração elétrica e emissões de GEE do setor elétrico brasileiro 119
Tabela 9 – Fator de emissão médio por fonte - toneladas CO_2e/GWh 119
Tabela 10 – Emissão de GEE por fonte - Milhões de toneladas CO_2e 120
Tabela 11 – Custos da geração elétrica por fonte existente em Sergipe 123

Lista de quadros

Quadro 1 – Dados principais e avaliação para o uso nas três escalas de análise. . . 29
Quadro 2 – Benefícios da energia elétrica FV. 47
Quadro 3 – Pesquisa Bibliográfica 68
Quadro 4 – Pesquisa Documental 68

Lista de abreviaturas e siglas

ABES	Atlas Brasileiro de Energia Solar
ABENS	Associação Brasileira de Energia Solar
Absolar	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Área de Proteção Permanente
BEN	Balanço Energético Nacional
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CO_2e	Dióxido de Carbono equivalente
EAM	Erro Absoluto Médio
EPAM	Erro Percentual Absoluto Médio
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
ESRA	Atlas de Radiação Solar Europeia
ETM	Erro de Tendência Média
GEE	Gases do Efeito Estufa
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
HSP	Horas de Sol Pleno
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
Kc	Coeficiente de céu claro
LiDAR	Light Detection And Ranging

MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital da Superfície
NASA	Administração Aeronáutica e Espacial dos Estados Unidos
NOAA	Administração Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organizações das Nações Unidas
PNE	Plano Nacional de Energia
PVGIS	Photovoltaic Geographic Information System
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
SAFER	Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
STC	Standard Testing Conditions
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
TL	Coeficiente de Turbidez de Linke
TOA	Topo da Atmosfera
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos

Sumário

I Introdução **18**

II Referencial Teórico **22**

1 Sol, fonte de energia primária para a Terra **23**
1.1 Energia elétrica FV 24
1.2 Modelos de geração FV 26
1.2.1 Geração FV centralizada 26
1.2.2 Geração FV distribuída 27
1.3 Estimativa de potencial FV 28
1.4 Desafios para adoção 30

2 Energia no Brasil **32**
2.1 Características de um sistema elétrico 32
2.1.1 Continuidade 32
2.1.2 Segurança 33
2.1.3 Confiabilidade 33
2.1.4 Sustentabilidade 33
2.1.5 Modicidade 33
2.1.6 Qualidade 34
2.2 Matriz elétrica brasileira 34
2.3 Incentivos financeiros 38
2.4 Potencial solar nacional 40
2.4.1 Brasil 41
2.4.2 Semiárido brasileiro 42
2.4.3 Sergipe 43

3 Benefícios além do ambiental **46**
3.1 Energia elétrica como direito social 48
3.2 Potencial solar e desenvolvimento social 49

4 Geoinformática para Análise Solar **51**
4.1 Geotecnologias 51
4.2 Sistemas de informações geográficas 51
4.3 Dados raster e vetor 52
4.4 Modelos solares 54
4.5 SIG para estimativa de energia solar 55

4.5.1 Avanços dos SIG para energia solar . . . 56
4.5.2 Onde e como já foi usado . . . 56
4.6 Aplicativo GRASS . . . 58
4.6.1 Módulo r.sun . . . 59
4.6.2 Módulo r.slope.aspect . . . 60
4.6.3 Módulo r.horizon . . . 60
4.6.4 Albedo . . . 61
4.6.5 Coeficiente de turbidez de Linke . . . 62
4.6.6 Coeficiente de céu claro . . . 63

III Metodologia **65**

5 Metodologia . . . 66
5.1 Classificação e caracterização da pesquisa . . . 66
5.2 Caracterização e delimitação da área de estudos . . . 68
5.3 Procedimentos metodológicos . . . 70
5.3.1 Determinação dos parâmetros para modelagem . . . 70
5.3.1.1 Imagens de satélites . . . 71
5.3.1.2 MDE . . . 71
5.3.1.3 Orientação e declividade do terreno . . . 72
5.3.1.4 Horizonte . . . 72
5.3.1.5 Albedo . . . 72
5.3.1.6 Turbidez de Linke . . . 74
5.3.2 Codificação do algoritmo de automatização . . . 75
5.3.3 Modelagem da radiação solar . . . 75
5.3.3.1 Radiação para o céu real . . . 76
5.3.3.2 Validação da modelagem . . . 77
5.3.4 Análise de locais para centrais FV . . . 78
5.3.4.1 Mapeamento das áreas disponíveis . . . 79
5.3.4.2 Avaliação da adequabilidade da área . . . 81
5.3.5 Potencial solar para usinas FV . . . 81
5.3.5.1 Potencial geográfico . . . 82
5.3.5.2 Potencial técnico . . . 82
5.3.5.3 Área ocupada pelos arranjos FV . . . 84
5.3.6 Avaliação dos impactos da nova fonte de energia . . . 86
5.3.6.1 Impactos energéticos . . . 87
5.3.6.2 Impactos ambientais . . . 87
5.3.6.3 Impactos socioeconômicos . . . 88
5.4 Limitações e fatores de incerteza . . . 89

5.4.1 Estações meteorológicas . . . 89
5.4.2 Cálculo do Kc . . . 90
5.4.3 Resolução espacial das imagens para áreas urbanas . . . 90
5.4.4 Mapas temáticos agrícolas . . . 91

IV Resultados e Discussões 92

6 Resultados e Discussões . . . 93
6.1 Parâmetros para modelagem . . . 93
6.1.1 Imagens de satélites . . . 93
6.1.2 MDE . . . 96
6.1.3 Albedo da superfície . . . 96
6.1.4 TL . . . 98
6.2 Algoritmo de automação . . . 99
6.3 Modelagem da radiação solar . . . 99
6.3.1 Validação da modelagem . . . 106
6.4 Análise de locais para usinas FV . . . 107
6.4.1 Mapeamento das áreas disponíveis . . . 107
6.4.2 Avaliação da adequabilidade da área . . . 109
6.5 Estimativa do potencial de geração FV . . . 115
6.6 Avaliação dos impactos da nova fonte de energia . . . 116
6.6.1 Impactos energéticos . . . 117
6.6.2 Impactos ambientais . . . 118
6.6.3 Impactos socioeconômicos . . . 120

Considerações finais . . . 124

Referências . . . 128

Apêndices 139

APÊNDICE A Algoritmo de Automação do Módulo r.sun . . . 140

APÊNDICE B Dados de Radiação Solar Direta para o Céu Claro . . . 145

APÊNDICE C Dados de Radiação Solar Difusa para o Céu Claro . . . 148

Parte I

Introdução

Introdução

Com uma demanda exponencial por energia elétrica e a necessidade crescente de se evitar o uso de fontes poluentes e não renováveis, nos deparamos no último século com a busca de novas fontes de energia limpas e renováveis. Esta diversificação das fontes de energia e a insustentabilidade dos combustíveis fósseis (finitos e ambientalmente nocivos) nos força a intensificar as pesquisas para a busca de novas fontes e seu melhor aproveitamento.

A energia solar é uma das alternativas que está permitindo reduzir a dependência de fontes de energia poluentes e não-renováveis. E o interesse nas pesquisas nesta área vêm aumentando devido aos potenciais benefícios para uma população urbana crescente, como eficiência, economia e impacto ambiental.

Apesar de a maior parte da energia produzida no Brasil ser originária de uma fonte limpa e renovável – a hidroelétrica; esta ainda está envolta em controvérsias devido aos impactos ambientais e sociais causados pela necessidade de inundação de grandes áreas com a construção de barragens, forçando o deslocamento de populações tradicionais, de espécies da fauna e a devastação de grandes áreas vegetadas. As novas fontes renováveis ainda apresentam desafios dignos de pesquisas por ainda serem pouco eficientes, seja pelo estágio de sua tecnologia, seja pela falta de informações por parte dos tomadores de decisões.

O Brasil reúne boas condições para aproveitamento de fontes renováveis de energia, com grande disponibilidade de recursos como os ventos e, principalmente, o sol. O potencial energético solar brasileiro, em especial no semiárido nordestino, é bastante considerável. Porém, a geração de energia solar, tanto térmica (para eletricidade e aquecimento), quanto fotovoltaica (FV), ainda é pequena. A participação da fonte solar em nossa matriz elétrica representa apenas 1,1% do total gerado no país, mesmo tendo um potencial médio anual maior que o potencial máximo europeu (PEREIRA *et al.*, 2017; EPE, 2020).

Apesar deste potencial latente, observando-se os mapas de radiação solar do Brasil, nota-se que as áreas de maior incidência de sol coincidem com aquelas de maior pobreza. O aproveitamento da energia solar para benefício socioeconômico e possível melhoria do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) dessas áreas é algo que deve ser estudado. Assim, uma questão foi levantada: **Qual o potencial solar para geração de energia FV no semiárido sergipano e seus impactos para a sociedade e o meio ambiente?**

Pesquisando nas bases de periódicos, verificamos algumas metodologias empregadas em países norte americanos, europeus e africanos aplicando Sistemas de Informações

Geográficas (SIG) para calcular o potencial energético solar em escala regional e local (HOFIERKA; KARNUK, 2009; REDWEIK *et al.*, 2013; CHOW *et al.*, 2014). Nas bases do Portal de Periódicos da CAPES, na base de artigos Google Scholar e nos Bancos Digitais de Teses e Dissertações (BDTD) das universidades nordestinas (região onde pretende-se realizar a pesquisa) não foram encontrados trabalhos desta natureza para o semiárido brasileiro.

Assim, a análise do potencial solar no semiárido sergipano em escala local e regional requer uma combinação de base de dados dos recursos solares regionais e a análise das condições locais que influenciam a disponibilidade de energia solar, justificando a realização desta pesquisa.

Uma metodologia capaz de realizar a análise deste potencial se dá pelo processamento de dados de sensoriamento remoto com SIG e a aplicação de modelos solares, permitindo simular e analisar a irradiância solar nos elementos do terreno e urbanos, e, por conseguinte, calcular o potencial de geração de energia FV, permitindo subsidiar projetos de sistemas de energia solar e geração distribuída.

Esse conjunto de recursos e ferramentas informáticas que se relacionam ao estudo da Terra foi batizada de geoinformática. Estudos envolvendo o uso de recursos da geoinformática para avaliação do potencial solar são comumente implementados em países europeus e norte americanos, regiões que não possuem as mesmas condições e recursos naturais existentes no Brasil, nem apresentando a motivação para o emprego dessas tecnologias em prol do benefício social de regiões com baixos índices de desenvolvimento humano, o que torna esta pesquisa uma oportunidade de averiguar a função social da energia solar.

Nossa hipótese é que, com o emprego da geoinformática poderemos estimar o potencial de geração de energia solar em escala regional no semiárido sergipano, produzindo informações que possibilitem subsidiar programas de energia FV com ênfase na melhoria das condições socioeconômicas da população.

Métodos de estimativa do potencial FV com aplicação da geoinformática já comprovaram que essa metodologia é viável, se configurando como importante ferramenta para projetos de geração de energia FV em áreas urbanizadas e não urbanizadas em escala regional. Sendo este pesquisador um profissional da área de tecnologia da informação e tendo estudado o SIG como ferramenta de planejamento ambiental na pesquisa de mestrado, buscamos agora aplicar essa tecnologia para a estimativa do potencial solar no semiárido sergipano com foco nos benefícios social e ambiental.

Objetivos

Procurando verificar se a hipótese ventilada para a resolução do problema tem sustentação e é adequada, definimos como objetivo geral deste trabalho: **Analisar o**

potencial de geração de energia elétrica FV no semiárido sergipano utilizando recursos da geoinformática.

Para atingir o objetivo geral traçamos os seguintes objetivos específicos:

a) Determinar os parâmetros iniciais necessários para a modelagem da radiação solar por um SIG;

b) Desenvolver um algoritmo em linguagem computacional para automatizar a modelagem;

c) Modelar a radiação solar com um SIG;

d) Analisar os locais ideais para instalação de centrais FV;

e) Calcular o potencial de geração de energia solar para centrais FV;

f) Avaliar os impactos energéticos, ambientais e socioeconômicos da entrada de uma fonte solar de energia elétrica no semiárido sergipano.

Com a conclusão desta pesquisa teremos como produto final uma base de dados detalhada dos recursos energéticos solares do semiárido sergipano que poderão servir de subsídio à projetos e programas de geração de energia solar FV ou termosolar, bem como para estudos agrometeorológicos que necessitem de dados de radiação solar da região, já com um estudo prévio sobre os impactos provocados por essa nova fonte de energia.

Além disso, também teremos como contribuição científica um pacote tecnológico composto de processos e procedimentos que, na ausência de uma rede de estações meteorológicas e solarimétricas, poderão ser replicados para quaisquer outras regiões do globo mapeadas por satélites (desde que realizados os devidos ajustes geodésicos). Assim torna-se possível gerar dados com boa resolução espacial e, consequentemente, fornecer resultados acurados capazes de produzir dados suficientes para projetos energéticos, em especial para áreas pobres social e tecnologicamente.

Parte II

Referencial Teórico

1 Sol, fonte de energia primária para a Terra

Fonte primária de energia para todos os processos físicos e químicos terrestres, desde a manutenção da vida e a produção vegetal, até os fenômenos meteorológicos, a energia radiante solar é um elemento essencial nos estudos ambientais e de disponibilidade energética, principalmente pelo fato de constituir uma fonte de energia limpa, abundante e, na escala temporal humana, inesgotável (PEREIRA *et al.*, 2007).

Parte desta radiação solar pode ser captada e convertida em outras formas úteis de energia, como térmica e elétrica. Para verificar a viabilidade técnica e econômica em projetos de geração de energia solar em determinada região, é fundamental quantificar a radiação solar neste local (ALMEIDA, 2013). Por conseguinte, são necessários dados sobre o potencial solar tanto do total anual, quanto sua variabilidade diária e ao longo do ano.

Como ressaltaram Hofierka e Karnuk (2009), os principais problemas que influenciam uma maior amplitude no uso da energia solar são a grande variação temporal e espacial dos padrões de radiação solar por diversos fatores. Por exemplo, os padrões básicos de variações sazonais e diárias devido à fatores astronômicos são fortemente modificadas por mudanças das condições atmosféricas, como nebulosidade e temperatura.

Adicionalmente às condições climáticas, a disponibilidade de radiação solar depende da latitude do local e posição no tempo. Essas variáveis implicam na potência de energia que atinge a superfície da Terra devido à inclinação do eixo de rotação do planeta e seu movimento de translação. Por conseguinte, a quantidade de horas de sol num dia difere em algumas regiões e períodos do ano, onde as variações são mais intensas nas regiões polares e períodos de solstício (FERREIRA *et al.*, 2018).

A Irradiância Solar denomina a densidade do fluxo radiativo solar recebido por uma superfície de área unitária em uma unidade de tempo, e sua unidade de expressão é energia por área por tempo, normalmente medida em Watts hora por metro quadrado por dia ($Wh/m^2/dia$) ou Joules por metro quadrado por dia ($J/m^2/dia$). O total diário de energia que chega à superfície terrestre se chama Irradiância Solar Global e é composta pela relação da Irradiância Solar Direta, aquela em que a radiação solar não sofre desvios em sua trajetória, e pela Irradiância Solar Difusa, que sofre espalhamento devido aos componentes atmosféricos (gases, poeira, aerossois, vapor de água, etc). E os mapas solarimétricos são utilizados para apresentar os valores das radiações global, direta e difusa, sendo elaborados a partir de modelos físicos ou computacionais (PEREIRA *et al.*, 2017).

Outro parâmetro importante nos estudos da energia solar são as Horas de Sol

Pleno (HSP), que corresponde à quantidade de horas em que a radiaçâo solar incidente em uma área (R_s) deve ser constante e igual a 1 kW/m^2 (PEREIRA *et al.*, 2007). O cálculo desta variável é representado por uma equação simples:

$$HSP = \frac{R_s(kWh/m^2)}{1(kW/m^2)} \tag{1.1}$$

Para Souza *et al.* (2011, p. 278), "qualquer aplicação de uso de energia solar deve começar pelo estudo das variações ao longo do ano, em termos regionais e para diferentes condições de exposição, pelo período mínimo de um ano". Desta forma, é possível conhecer a disponibilidade energética diurna, mensal e anual de determinada região a partir das séries temporais e espaciais das componentes da radiação incidente na superfície.

Pesquisadores também identificaram que as variações das temperaturas locais podem influenciar na redução da geração de energia elétrica, devido à interferência na eficiência dos módulos solares, fato que nos obriga a considerar a temperatura ambiente nas pesquisas sobre os recursos solares (SÁNCHEZ-LOZANO *et al.*, 2013).

Em resumo, o recurso solar é determinado pela latitude, continentalidade, terreno e variações climáticas locais (ŠÚRI *et al.*, 2007). Na escala global, a geometria da Terra e sua rotação determinam a radiação gradiente latitudinal. Na escala local, o mapa de radiação solar depende da superfície do terreno e dos elementos urbanos, pois as variações de elevação, inclinação, aspecto e sombreamento causam desvios significativos de radiação solar.

Mesmo com todas essas variáveis a considerar, um bom nível de irradiação solar global, que normalmente ocorre em regiões com alta incidência de irradiação solar direta, é o pré-requisito principal para a geração de energia elétrica de fonte solar, independente do sistema a ser implementado (TIBA *et al.*, 2014).

1.1 Energia elétrica FV

A energia FV é uma das alternativas para aproveitamento da energia solar que está permitindo reduzir a dependência do consumo de combustíveis fósseis, em especial devido aos potenciais benefícios para uma população urbana crescente e para suprimento de áreas isoladas.

De maneira objetiva, podemos explicar a energia elétrica FV como sendo a energia gerada a partir da conversão direta de luz do Sol em eletricidade por meio de células FV (SUN *et al.*, 2013). Mediante processos de otimização das tecnologias e das aplicações da energia FV, construções e comunidades poderiam potencialmente ter a oportunidade de ser autossustentáveis, o que poderia aliviar a grande demanda por eletricidade atualmente requerida da infraestrutura de transmissão e distribuição de energia.

Embora a energia FV ainda não tenha atingido uma grande capilaridade, ela já provou ser bastante confiável, e esforços significativos vêm sendo feitos em pesquisas objetivando a redução dos custos de fabricação e aumento da eficiência das células FV (SÁNCHEZ-LOZANO *et al.*, 2013).

Um sistema FV é composto em geral, por um inversor, que transforma a corrente contínua gerada pelos paineis solares em corrente alternada, que é aquela utilizada pelos aparelhos que utilizamos no dia a dia; por paineis FV; e, opcionalmente, a depender do modelo de infraestrutura usada, por unidades de armazenamento de energia, as baterias. Os principais elementos dos paineis ou módulos FV são as células FV, responsáveis pela conversão da radiação solar em energia elétrica.

O calcanhar de Aquiles desta tecnologia é a eficiência das células FV e seu material constitutivo. Atualmente, as principais tecnologias disponíveis no mercado para produção de energia solar FV podem ser divididas de acordo com a matéria prima usada nas células, tais como: silício cristalino, silício amorfo hidrogenado, telureto de cádmio, composto de cobre, gálio e índio seleneto, módulos coloridos, e módulos de alta potência. A eficiência teórica de uma célula de silício amorfo hidrogenado alcança 33%, entretanto em escala comercial está entre 18-20%, enquanto que as células de silício cristalino alcançam entre 15-16% (FERREIRA *et al.*, 2018).

Segundo o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), as células de silício cristalino representam 95% do mercado, devido seu custo e eficiência. Para este instituto brasileiro, um módulo FV de silício mono ou policristalino se enquadra na classe de eficiência mais alta – Classe A, ao alcançar uma taxa de eficiência real acima de 13,5%. No último relatório apresentado sobre eficiência energética dos módulos FV comercializados por 148 empresas no Brasil, o módulo mais eficiente alcançou uma taxa de 18,5%, isso significa que: a quantidade de radiação solar convertida em eletricidade foi de apenas 18,5%, isso sob condições controladas em laboratório (INMETRO, 2017), definidas nas Condições Padrões de Testes[1](STC, em inglês, Standard Testing Conditions).

Apesar desses quesitos de custo e eficiência parecerem desanimadores, a energia solar deve ser vista como um sistema complementar ao sistema tradicional brasileiro, pois seu período de pico de produção coincide justamente com a estação seca, quando há redução dos reservatórios das hidroelétricas (CARSTENS; CUNHA, 2019). Neste cenário, os sistemas FV injetarão uma maior carga na rede elétrica, reduzindo a demanda de centrais de energia térmica, abastecidas por combustíveis fósseis, que além de poluentes geram custos adicionais aos consumidores brasileiros.

[1] A STC considera a temperatura da célula a 25°C, espectro de massa de ar 1,5, irradiação solar padronizada de 1000W/m^2. O que pode ser considerada a irradiação ao meio-dia de um dia claro e quente (INMETRO, 2011)

1.2 Modelos de geração FV

Devido a sua característica modular, os sistemas de geração de energia FV podem ser escalonados, ou seja, podem ser dimensionados conforme a área disponível. Isso significa que um mesmo módulo FV tanto pode ser instalado num telhado residencial ou de um galpão industrial, como numa central de geração elétrica solar. Essa peculiaridade permite que a tecnologia FV seja empregada em dois modelos de geração distintas: centralizada e distribuída.

1.2.1 Geração FV centralizada

O modelo de geração centralizada funciona com a instalação de um conjunto de módulos solares interconectados operados por um ente corporativo ou público que distribui energia pela rede de transmissão pública, ou seja, tem o objetivo de produzir e fornecer eletricidade para o consumidor final.

Por necessitar uma grande área para ser instalada, a construção de uma central de geração FV precisa considerar alguns requisitos a mais que o modelo distribuído, como: custo de investimento, custo de infraestrutura (vias de transporte e linhas de transmissão), custo de manutenção e operação anual, tempo de vida útil dos componentes, interesse dos investidores e produção de energia elétrica anual (TIBA *et al.*, 2014).

Além desses pontos, áreas consideradas nobres para outros fins são consideradas inadequadas para construção dessas centrais, como por exemplo: áreas de proteção permanente (APP), povoamentos e terras cultiváveis. Por esses aspectos, o modelo de geração centralizada necessita de estudos de viabilidade técnica e econômica bastante profundos.

A escolha do local adequado para instalação de uma central energética envolve a análise desses vários critérios que podem limitar ou potencializar a instalação do empreendimento. No caso de uma central de geração FV, que busca entre outros objetivos a preservação e conservação dos recursos naturais, as limitações ambientais se tornam muito mais importantes, exigindo métodos especiais para produzir informações que subsidiem a tomada de decisões.

Para auxiliar numa tomada de decisões baseada em múltiplos critérios, o método Analytic Hierarchy Process (AHP, Processo de Hierarquia Analítica) desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1980, nos Estados Unidos (SAATY, 1990) se mostrou bastante efetivo, sendo utilizado ao longo dos anos em vários trabalhos científicos envolvendo o uso de SIG para energia solar (NGUYEN; PEARCE, 2010; SÁNCHEZ-LOZANO *et al.*, 2013; PINTOR *et al.*, 2015; AZEVÊDO *et al.*, 2017). A metodologia AHP foi aceita pela comunidade científica internacional como uma ferramenta robusta e flexível de tomada de decisão com múltiplos critérios para lidar com problemas complexos.

O AHP é empregado especificamente na análise da aptidão de locais, pela aplicação de pesos para critérios que influenciam no alcance de um objetivo. Esse processo é realizado em ambiente SIG sobre dados vetoriais ou matriciais que resultam na geração de um mapa onde é possível visualizar o grau de adequabilidade da área pesquisada para o embasamento da tomada de decisão (PIMENTA *et al.*, 2019).

1.2.2 Geração FV distribuída

No modelo de geração distribuída ou descentralizada, os módulos solares são instalados nos telhados das construções urbanas e utilizam acumuladores para armazenar a energia excedente para os horários onde não há produção energética solar ou utilizam um sistema conectado à rede pública de distribuição, injetando o excedente pelo dia, e consumindo da rede convencional durante a noite, de maneira complementar. As áreas urbanas são locais estratégicos para implantação de infraestrutura para energia solar conectada à rede, do ponto de vista da concentração populacional e oportunidades de empregos e negócios (ALAM *et al.*, 2016).

Em 2015, a Resolução Normativa n.º 687 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estipulou a possibilidade de um novo formato de geração distribuída, a cooperativa ou consórcio de energia solar (ANEEL, 2015). Neste formato, vários consumidores podem se organizar em consórcio ou cooperativa para instalação de um sistema FV em uma área remota, e assim compartilhar a energia gerada distribuída para a rede. É o caso daqueles consumidores que moram em pequenas residências ou apartamentos, e não possuem área suficiente para instalação de um sistema FV.

Estudos já comprovaram a viabilidade técnica e econômica da implantação de sistemas de geração FV conectados à rede em áreas urbanas, garantindo maior segurança energética das cidades e contribuindo para a redução das emissões de poluentes (QUAN *et al.*, 2015; WONG *et al.*, 2016). Com esse sistema associado à construções mais eficientes do ponto de vista energético, há inclusive a possibilidade de construções do tipo "net-zero", que geram tanta energia de fontes renováveis quanto consomem em um ano médio, desta forma, novas construções e comunidades poderiam potencialmente ter a oportunidade de ser autossustentáveis (CHOW *et al.*, 2014).

Segundo Jones *et al.* (2000) e Santos e Rüther (2009), além das vantagens do ponto de vista energético e ambiental, os sistemas solares FV, especialmente aqueles integrados às construções urbanas e conectados à rede, oferecem outras vantagens ao sistema elétrico quanto à economia nos custos, que muitas vezes não são considerados ou quantificados, tais como:

a) Baixo custo de manutenção, já que não possuem partes móveis e são projetados para permanecer sob condições climáticas diversas;

b) Fonte de energia inesgotável (na escala temporal humana) limpa e gratuita, o que isenta do pagamento de compensações ambientais e de uso pelo recurso;

c) Redução de perdas na transmissão e distribuição, pois a energia é consumida onde é produzida;

d) Redução do investimento em linhas de transmissão e distribuição;

e) A instalação dos módulos FV não requerem área física dedicada, podem ser instalados sobre os telhados;

f) Quando distribuídos estrategicamente, geradores FV oferecem capacidade mínima de geração ociosa por sua grande modularidade que permite instalações de curto prazo, agilizando o atendimento à demanda adicional de capacidade de geração.

Observando esta conclusão a que chegaram as pesquisas, é possível pensar na viabilidade de um modelo distribuído escalável, onde uma comunidade, de forma conjunta, venda seu excedente à distribuidora de energia (pública ou concessionária), criando uma opção interessante do ponto de vista social, com a redução dos custos de energia pela compensação tarifária; econômico, para a indústria do setor e pela redução dos custos de transmissão e distribuição para o governo; e energético, para ambos, governo e população.

1.3 Estimativa de potencial FV

O potencial FV é a quantidade de energia potencialmente gerada a partir da tecnologia FV no período de um ano. A modelagem, o mapeamento e a estimativa do potencial energético espacial e temporalmente, são essenciais para aumentar a capacidade de avaliação da utilização de energias renováveis e geração de dados e informações para o planejamento das empresas do setor e às comunidades (CHOW *et al.*, 2014; QUAN *et al.*, 2015).

A radiação solar incidente sobre a superfície da Terra é resultado de complexas interações da energia entre a atmosfera e a superfície. Em escala global, as variações de radiação latitudinal são provocadas pela geometria da Terra e sua rotação e revolução ao redor do sol. Nas escalas regional e local, o relevo é o maior fator modificador da distribuição de radiação. A variabilidade na elevação, inclinação e orientação da superfície, e o sombreamento provocado pelas características do terreno e dos elementos urbanos, criam fortes gradientes locais (HOFIERKA; ŠÚRI, 2002).

Destarte, o primeiro parâmetro que o pesquisador deve definir para a estimativa que pretende calcular é a escala espacial com a qual pretende trabalhar, uma vez que isso determinará os meios que utilizará, e a precisão dos resultados. No trabalho de Lange

(2012), foi elaborado um quadro (quadro 1) para apresentar as exigências e critérios para avaliação do potencial solar nas escalas nacional, regional e local.

Chow *et al.* (2014) e Wong *et al.* (2016) também ressaltaram em seus estudos que a estimativa de um sistema quando instalado em uma única construção não pode ser escalado para centros urbanos, pois o desempenho geral dos sistemas não é igual à simples somatória dos desempenhos individuais de cada construção devido às interações dos sistemas. Ou seja, os elementos urbanos e a infraestrutura das cidades provocam interferências, tais como: sombreamento, correntes de vento, ilhas de calor, etc., que alteram o desempenho energético dos módulos FV.

Quadro 1: Dados principais e avaliação para o uso nas três escalas de análise.

Dados principais	Nacional/regional	Regional/local	Local
Irradiação	Latitude, dados climáticos	Latitude, dados climáticos	Latitude, dados climáticos
Área dos telhados	Estimativa por dados secundários	Estimativa pela tipologia de assentamentos	Dados das edificações
Modelo digital usado	Aplicado somente em regiões muito montanhosas	Modelo Digital de Elevação (MDE)	Modelo Digital da Superfície (MDS)
Fatores limitantes	Estimativa por dados secundários	Estimativa por dados secundários	Cadastro municipal
Vantagens	Aplicável em grande escala	Aquisição rápida e barata de dados	Maior precisão
Desvantagens	Grande margem de erro devido às estimativas	Margem de erro devido às generalizações	Dados necessários são caros

Fonte: Lange (2012)

Quanto aos tipos de modelos digitais, a diferença entre um MDE e um MDS, é que o primeiro tipo é um modelo de dados que representa o relevo do terreno considerando a altitude em relação ao nível do mar. Já o MDS é um modelo digital que representa a altitude de qualquer elemento existente sobre o terreno em relação ao nível do solo, tais como: edificações, rochas, vegetação, corpos d'água (SHORT, 2009).

Assim, fica claro que além das escalas espacial e temporal, outros parâmetros são determinantes para a estimativa do potencial FV, uma vez que a irradiação solar que atinge um ponto em um período de tempo varia de acordo com fatores globais, locais, espaciais, temporais e meteorológicos, que precisam ser levados em conta para o mapeamento do potencial solar de uma área estudada, identificando as áreas com máxima irradiação solar e para auxiliar na orientação das instalações dos módulos FV (REDWEIK *et al.*, 2013; CHOW *et al.*, 2014).

O fator meteorológico, relacionado às variáveis climáticas que interferem na gera-

ção de eletricidade e na taxa de eficiência dos módulos FV são: nebulosidade, composição do ar e temperatura atmosférica.

Os fatores global e temporal estão intimamente ligados, pois estão relacionados ao movimento de translação da Terra, que define o ângulo que os raios solares atingem a superfície do planeta e o período de visibilidade do Sol, que varia em algumas regiões e períodos do ano (FERREIRA *et al.*, 2018).

Os fatores espacial e local estão relacionados à superfície do terreno, o primeiro ao relevo e suas variações de elevação, inclinação, aspecto e sombreamento; e o segundo, ao uso e cobertura do solo. Essas variações causam desvios significativos na radiação solar e diferentes métodos precisam ser empregados para a estimativa do potencial solar de acordo com a escala e acurácia desejada (WONG *et al.*, 2016).

1.4 Desafios para adoção

Apesar das diversas vantagens apontadas com a adoção da energia solar, obstáculos ainda precisam ser mitigados para a expansão do uso dessa fonte de energia renovável. Os principais desafios para órgãos governamentais e não-governamentais identificados por diversos pesquisadores para adoção da energia solar no mundo são a falta de informações sobre o potencial solar em escala regional e a necessidade de incentivos governamentais devido aos custos envolvidos (MARTINS *et al.*, 2005; SÁNCHEZ-LOZANO *et al.*, 2013; ALAM *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2018).

Segundo Carstens e Cunha (2019), em seu estudo sobre os desafios e oportunidades de crescimento da energia FV no Brasil, essa tecnologia ainda se encontra em uma fase de nicho, ou seja, uma fase inicial onde é utilizada por alguns segmentos socais, e necessita de maior valorização para sua maturação e desenvolvimento a fim de evoluir a ponto de competir com as tecnologias já estabelecidas no sistema.

A necessidade de informações confiáveis sobre os recursos renováveis como um todo é imprescindível para avaliar os riscos associados à fatores climático-ambientais que podem estar envolvidos em projetos energéticos que utilizem essas fontes de energia. Qualquer tipo de investimento precede um planejamento embasado de forma robusta em dados e informações científicas, o que torna essa uma questão primordial para a aceitação e expansão da energia solar no mundo.

Existe uma busca incessante por informações por parte de órgãos governamentais, universidades e empresas de pesquisa e desenvolvimento da área energética sobre novas tecnologias nacionais e internacionais (CARSTENS; CUNHA, 2019). A difusão do conhecimento é o ponto de partida para alavancar qualquer tecnologia, e os atores envolvidos anseiam por essa troca de informações que acarreta a evolução científica e tecnológica da

energia solar em todas as sociedades.

No Brasil, apesar dos incentivos criados até o ano 2019, o processo de adoção da tecnologia de geração FV ainda é lento. Esse fato também se dá pela ausência de recursos humanos com educação formal e de uma rede de mobilização da indústria em todos os níveis (CARSTENS; CUNHA, 2019).

Esses fatores demonstram que ainda são necessárias mais pesquisas para expansão da energia solar e aumento da eficiência dos materiais. Bem como no planejamento urbano sustentável, como forma de facilitar o desenvolvimento da energia solar e aplicar as principais ideias de otimização solar em busca de uma sustentabilidade ambiental como uma prática comum.

2 Energia no Brasil

No Brasil, a principal fonte energética é de base hidráulica, que vem sendo usada há mais de 100 anos. Entretanto, devido à super exploração e ante questões ambientais, nos impele na busca de outras fontes de energia. Porém, o uso de outras fontes renováveis e limpas, ainda é tímido no Brasil em comparação a outros países, ainda que exista um movimento do governo para incentivos à novas fontes renováveis de energia. A eletrificação do campo e a instalação de novas indústrias nos últimos anos fizeram a demanda por energia elétrica crescer rapidamente, o que não foi acompanhado pelo aumento da produção primária de energia (FERREIRA *et al.*, 2018).

2.1 Características de um sistema elétrico

Para compreendermos um sistema elétrico, antes precisamos conhecer quais as características que o definem. Segundo Leontina (2018), essas características são:

1. Continuidade;
2. Segurança;
3. Confiabilidade;
4. Sustentabilidade;
5. Modicidade.

2.1.1 Continuidade

A continuidade diz respeito à capacidade de manter o fornecimento de energia elétrica de forma constante, também pode ser chamada de disponibilidade. Apesar de ser considerado pela autora como o conceito mais simples, ela também acredita ser essa a característica mais difícil de ser cumprida pelo fornecedor (LEONTINA, 2018). A variabilidade sazonal e climática dos sistemas elétricos FV (e solares como um todo) é um desafio considerável ao operador do sistema, o que lhe exige fontes complementares para aqueles períodos quando a geração elétrica da fonte principal não atende a demanda.

Em todo Brasil, especialmente na região semiárida, a energia de fontes hidroelétrica e solar funcionam perfeitamente de forma complementar uma da outra, pois a escassez hídrica nos períodos de seca que afetam o armazenamento das barragens seria

compensada pelo aumento da radiação solar, devido ao fato de a variabilidade climática e solar nessa região serem baixas, e as horas de sol serem conhecidas e previsíveis (PEREIRA *et al.*, 2007; TIBA *et al.*, 2014).

2.1.2 Segurança

A segurança de um sistema elétrico está relacionada à capacidade de se manter a carga de energia na rede diante de cenários climatológicos adversos, evitando risco de racionamento, como já ocorreu no Brasil. Leontina (2018) ressalta porém que as energias intermitentes (solar e eólica) devem ser planejadas como fontes complementares às fontes tradicionais, até que essas novas tecnologias avancem a ponto de se tornarem mais eficientes.

2.1.3 Confiabilidade

A carga de energia deve suportar falhas fortuitas na geração, transmissão e distribuição, sem interrupção do fornecimento e dentro dos padrões de qualidade (ONS, 2019). Apesar de próximos, os conceitos de segurança e confiabilidade não são iguais: a segurança está relacionada à capacidade de armazenamento de energia (no caso das hidroelétricas, os reservatórios), que atingindo níveis críticos, podem levar muito tempo para serem restabelecidos. E a confiabilidade está relacionada à perda de carga por falhas na produção/distribuição, onde o tempo necessário para restabelecimento normalmente leva algumas horas, e raramente mais que um dia (LEONTINA, 2018). Podemos relacionar a segurança ao racionamento de energia e a confiabilidade aos apagões.

2.1.4 Sustentabilidade

A sustentabilidade diz respeito ao quão limpa e renovável é a fonte de energia do sistema. Segundo Leontina (2018), a chamada energia verde "é um aspecto, que embora ainda não comumente precificado no Brasil, é reconhecidamente um anseio da sociedade". Neste quesito, o Brasil possui um grande potencial para geração de energia limpa e com diversas fontes que podem se complementar, de forma a minimizar o uso de fontes poluentes como as termoelétricas.

2.1.5 Modicidade

A última característica de um sistema elétrico está relacionada ao custo da energia, onde a carga precisa ser suprida com o menor custo possível, cumprindo todos os requisitos anteriores de qualidade. Esse é um grande desafio à energia solar FV, devido aos altos custos dos materiais, em especial no Brasil pela necessidade de importação das células solares e módulos inversores.

2.1.6 Qualidade

Além das características supracitadas, ainda acrescentamos o item Qualidade da Energia Elétrica. A ANEEL considera três aspectos para mensurar essa característica: a qualidade do produto (a energia), a qualidade do serviço prestado e a qualidade do atendimento ao consumidor (ANEEL, 2020a).

A qualidade do produto diz respeito à conformidade de tensão e as perturbações no fornecimento da eletricidade. O monitoramento dessas variáveis é realizada de forma amostral em unidade consumidoras na área de atuação de cada distribuidora de energia. A baixa qualidade nesse quesito pode ocasionar danos aos equipamentos elétricos numa residência e a ANEEL estabelece critérios de compensação ao consumidor.

A qualidade dos serviços prestados se refere ao monitoramento da continuidade no fornecimento de energia, ou seja, compreende a avaliação das interrupções no fornecimento de energia elétrica por mais de três minutos. Nesse item também se estabelece o tempo de resposta da distribuidora para a resolução dos problemas relacionados ao fornecimento de energia.

No quesito qualidade do atendimento, a ANEEL estabelece três aspectos: a qualidade do atendimento comercial, a qualidade do atendimento telefônico e o tratamento das informações.

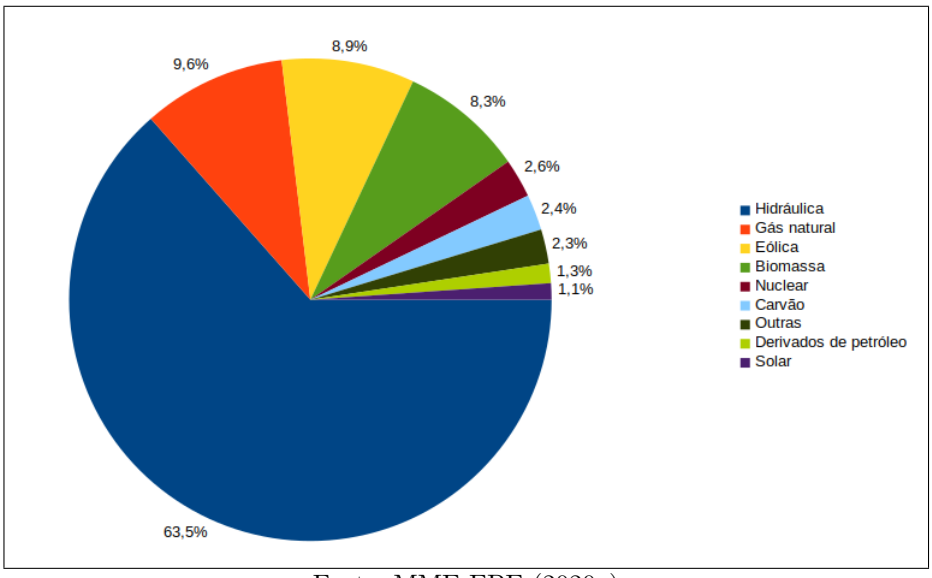
2.2 Matriz elétrica brasileira

Como já mencionamos anteriormente, a fonte hidroelétrica tem a maior participação na matriz de geração elétrica brasileira, representando 63,5% da oferta interna segundo o último Balanço Energético Nacional, produzido pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) (MME-EPE, 2020a). Isso significa que o país dispõe de uma matriz elétrica predominantemente limpa e renovável (Figura 1).

Apesar desse dado importante sobre a renovabilidade e limpeza da matriz elétrica brasileira, alguns pesquisadores levantam preocupações relevantes diante das questões ambientais e sociais envolvidas nas construções de barragens. De um lado destaca-se o esgotamento da capacidade de armazenamento hídrico atual e do outro os conflitos socioambientais com a construção de novas hidroelétricas.

Para Leontina (2018), a nossa dependência hidroelétrica está perto do fim, pois "a nossa capacidade de armazenamento energético [armazenamento hidroelétrico] está próxima do esgotamento". Segundo dados da EPE (2018), se o ritmo de crescimento do consumo se mantiver, sem a expansão de outras fontes de eletricidade, pelas projeções, em poucos anos teremos capacidade de armazenamento de energia hidroelétrica equivalente a somente três meses e meio de consumo, e uma seca moderada poderá afetar a segurança

Figura 1: Matriz Elétrica 2020, ano base 2019.



Fonte: MME-EPE (2020a)

energética e levar o país a um racionamento em poucos meses. Isso considerando a capacidade de armazenamento e não a armazenada, que atualmente já sofre com problemas devido à escassez hídrica dos últimos anos, e que levou o país à necessidade de acionar as usinas termoelétricas, e consequentemente, ao aumento das tarifas energéticas e da emissão de poluentes.

Para suprir esse problema de redução da capacidade de armazenamento hidroelétrico, a única alternativa seria a construção de novas usinas e barragens. Porém os rios das regiões Nordeste, Sudeste e Sul, já se encontram em sua capacidade máxima de aproveitamento. As novas fronteiras a serem exploradas estão nas regiões Norte e Centro-Oeste, mas devido à cobrança cada vez maior pela preservação ambiental e o alto custo de transmissão nessas regiões, esses empreendimentos agregam muitas incertezas (TIBA *et al.*, 2014). A Usina de Belo Monte, no Pará, é um bom exemplo de todos os problemas que envolvem a construção de uma hidroelétrica naquela região.

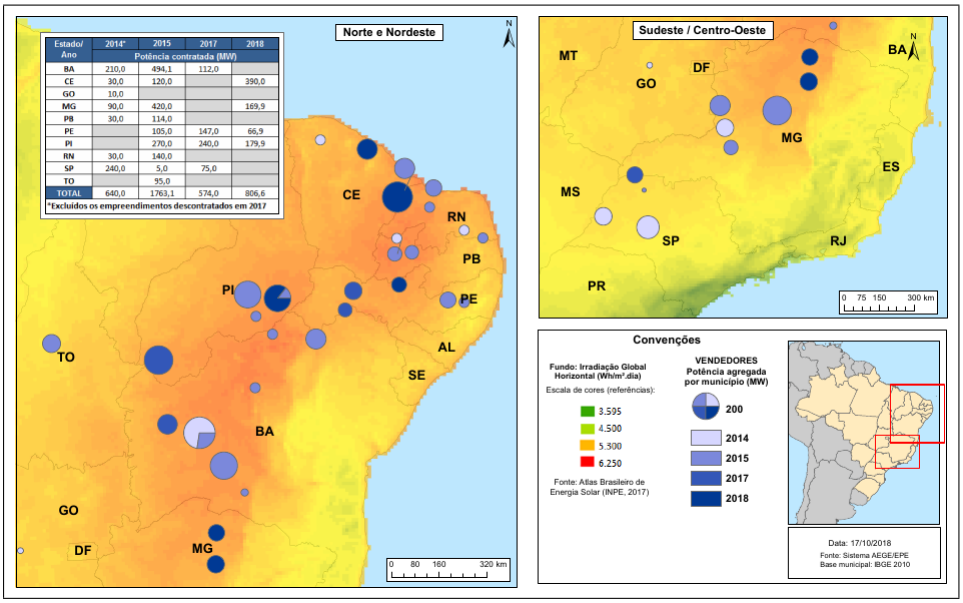
Por estar localizado numa região intertropical e possuir extensão territorial continental, o Brasil guarda um enorme potencial para utilização de fontes renováveis, especialmente a solar. Com planejamento adequado, essa característica beneficia o país no longo prazo, regulando o suprimento de eletricidade nos períodos de escassez hídrica, reduzindo o custo de eletrificação em áreas remotas onde o fornecimento pela rede convencional é muito alta e evitando o acionamento de usinas termoelétricas poluentes e de alto custo para o consumidor final (FERREIRA *et al.*, 2018; CARSTENS; CUNHA, 2019).

O Balanço Energético Nacional de 2020 ano-base 2019 destacou o aumento de 92,1% na geração FV entre os anos de 2018 e 2019, passando de 3.461 GWh para 6.650 GWh, em detrimento da redução de 23,8% da geração de eletricidade a partir de derivados de petróleo. O Brasil ainda se destaca por sua pequena participação na emissão de CO_2

por MWh gerado, emitindo em média 82% menos que a China, 72% menos que os EUA e 65% menos que a União Europeia (MME-EPE, 2020a).

Entre os anos de 2014 a 2018, por intermédio de leilões públicos, 143 projetos para geração FV centralizada foram contratados no Brasil, resultando na comercialização de 4.034 MW de energia. O maior número de projetos cadastrados e, posteriormente, contratados nesses leilões se encontram na região Nordeste, apenas nos estados de Sergipe, Alagoas e Maranhão não houveram contratações, como podemos visualizar na figura 2 (MME-EPE, 2018c).

Figura 2: Empreendimentos FV vencedores nos leilões de energia de 2014 a 2018.

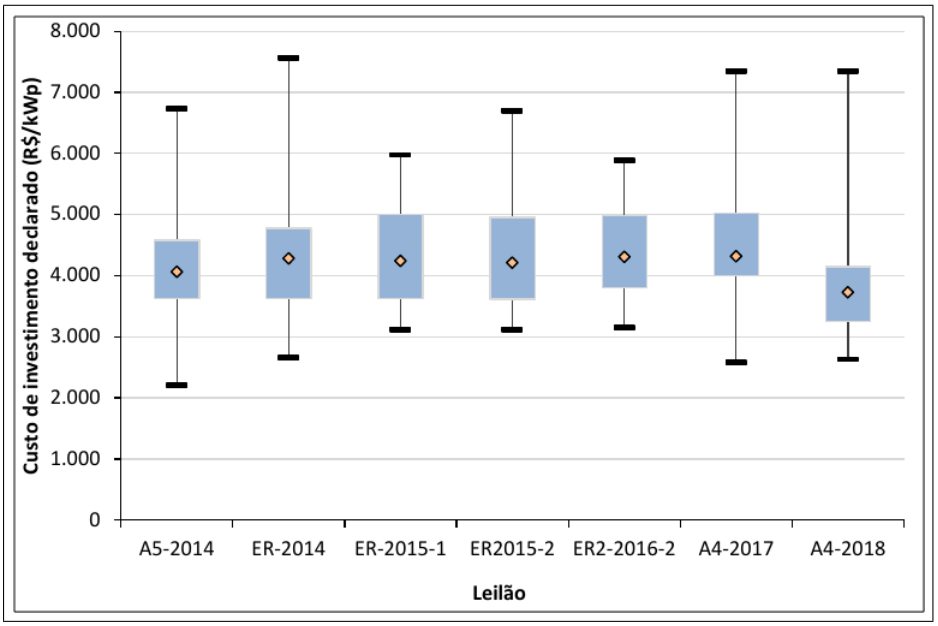


Fonte: MME-EPE (2018c)

Com relação à viabilidade econômica da energia solar, apesar de publicações apontarem uma redução nos custos dos projetos FV no decorrer dos anos, os orçamentos dos projetos apresentados pelos empreendedores para os leilões de energia no Brasil apresentam uma constância de valores médios (em R$/kWp) até o ano de 2017, e somente em 2018 houve uma queda de 14%, como podemos observar na figura 3. Porém, considerando que os custos dos empreendimentos FV estarem bastante atrelados ao valor do dólar americano em virtude dos componentes importados, observou-se que o custo de investimento em termos de US$/kWp teve considerável redução nos três últimos leilões (figura 4), o que está alinhado com as pesquisas (MME-EPE, 2018c).

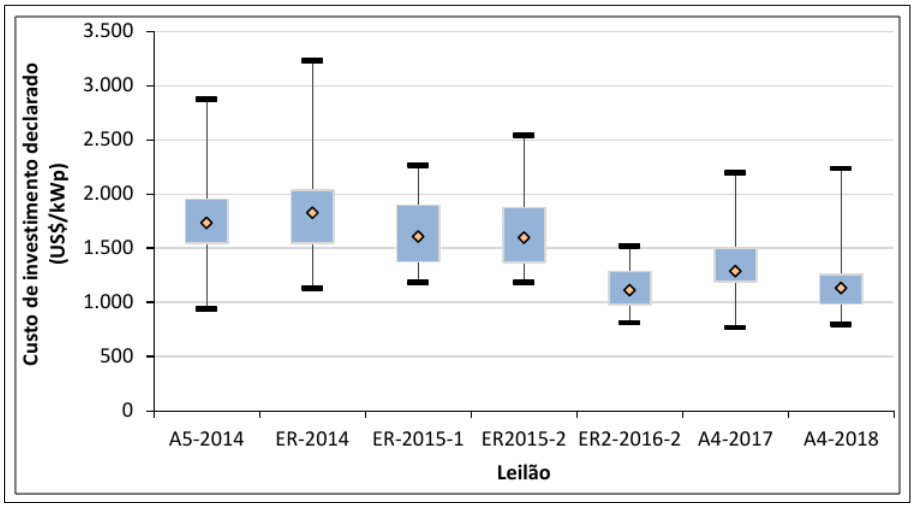
A redução dos custos de investimento e o aumento da concorrência entre empresas devido aos leilões públicos de energia elétrica contribuíram sobremaneira para a queda do preço da energia no Brasil. Entre os leilões de 2014 e 2018 o preço médio da energia FV caiu de R$ 272,50/MWh para R$120,60/MWh, o que representa uma redução de 55,74% (figura 5) (MME-EPE, 2018c). Para ilustrar a viabilidade da energia FV no Brasil, no edital do leilão publicado mais recentemente (A-4 N.3 2019), o preço inicial de venda e

Figura 3: Custo de investimento declarado em Reais nos leilões para projetos FV.



Fonte: MME-EPE (2018c)

Figura 4: Custo de investimento declarado em Dólares nos leilões para projetos FV.



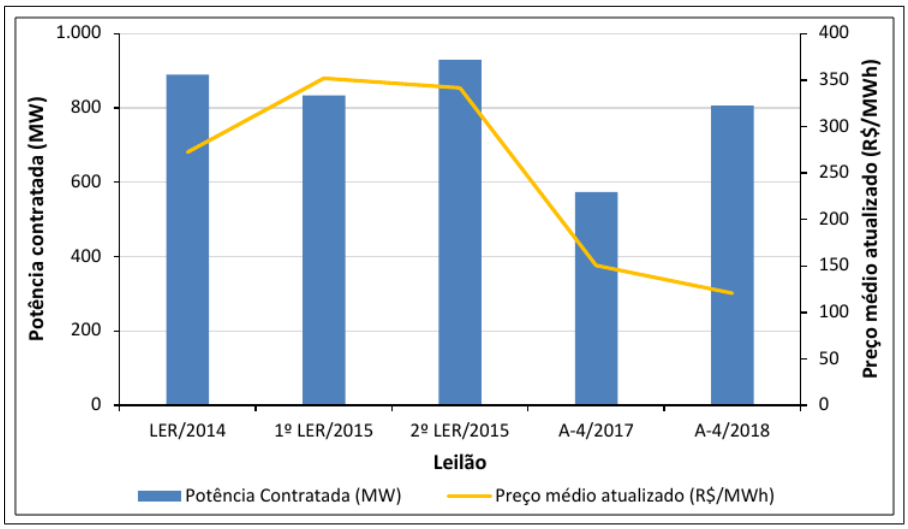
Fonte: MME-EPE (2018c)

custo de referência para a energia de fonte hidroelétrica foi de R$ 288,00/MWh, enquanto que para a energia FV foi de R$ 276,00/MWh (ANEEL, 2019), valores que tendem a cair bastante no processo do leilão.

Nesse mesmo leilão supramencionado, o maior número de projetos cadastrados para participação foram para fornecimento de energia FV e eólica, 751 projetos, sendo que a potência ofertada de energia FV foi maior, correspondendo a 51,3% do total de 51.204 MW esperados. E, novamente, para o estado de Sergipe não houve qualquer projeto para energia FV (ANEEL, 2019).

O último Plano Decenal da MME-EPE (2018a), indica que as energias renováveis como um todo atingirão 48% de toda matriz energética brasileira ao final do ano de 2027,

Figura 5: Preços médios por leilão de 2014 a 2018.



Fonte: MME-EPE (2018c)

ao passo que as fontes renováveis, incluindo a hidroeletricidade, responderão por 86% da oferta de energia elétrica. Para atingir esses parâmetros, estima-se que serão necessários investimentos da ordem de R$ 1,8 trilhão entre 2018 e 2027.

Infelizmente, devido à pandemia do COVID-19, todos os leilões de energia previstos para o ano de 2020 foram postergados por tempo indeterminado, o que certamente afetou o crescimento da adoção da energia solar no Brasil (MME, 2020). Essa catástrofe sanitária irá forçar o Brasil e todos os outros países a reverem seus planos de expansão de energia para as próximas décadas.

2.3 Incentivos financeiros

Incentivos e custos são questões indissociáveis, e os custos da tecnologia FV no Brasil ainda assustam os produtores de energia que não possuem fácil acesso a subsídios. Além de que, a eficiência dos materiais e o fator sazonalidade climática podem tornar o custo da geração FV superior ao da energia de outras fontes, tornando fundamental a adoção de políticas mais contundentes de incentivo para promoção do desenvolvimento da energia solar (SUN *et al.*, 2013).

Apesar disso, do ponto de vista econômico, até no Brasil, onde os custos de equipamentos importados são muito altos, a competitividade da tecnologia FV promovida pelos leilões públicos está estimulando o mercado e derrubando os custos de geração da energia de fonte solar. Entretanto as políticas públicas de incentivos, os investimentos no barateamento da tecnologia e em pesquisas de melhoramento da eficiência dos materiais precisam continuar contribuindo para o avanço na adoção da energia FV.

Em uma pesquisa recente, dados apresentados mostraram que, a nível mundial, o preço das células FV de silício caíram 99,5%, passando de iniciais US$ 76,67 para US$

0,30, entre 1977 e 2015. No Brasil, 67% do custo total de instalação corresponde apenas aos módulos FV e ao inversor de energia, produtos normalmente importados. Considerando que no câmbio há época da pesquisa R$ 1,00 correspondia a US$ 0,30, os custos para instalar um sistema FV típico de 1,5 kW para cada estado brasileiro, calculado pelo custo dos módulos solares no Brasil, a irradiação solar da região e o custo regional de instalação, o preço mínimo mais barato foi de R$ 13.900,00 para a capital de Pernambuco, e o preço máximo do sistema foi de R$ 24.600,00 para Curitiba, capital do Paraná. Para Aracaju os preços levantados ficaram entre R$ 14.400,00 (preço mínimo) e R$ 19.440,00 (preço máximo) (FERREIRA *et al.*, 2018).

No Brasil, os principais incentivos para a geração de energia elétrica FV distribuída se dá pelas resoluções normativas da ANEEL de n.^{os} 482/2012 e 687/2015. A resolução n.º 482 de 17 de abril de 2012 estabelece as condições gerais para o acesso de micro e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia. E a resolução normativa n.º 687, publicada em 24 de novembro de 2015, que altera a resolução n.º 482/2012, se destaca pela inclusão dos modelos de geração compartilhada e do autoconsumo remoto (ANEEL, 2012; ANEEL, 2015).

Alguns programas no Brasil também se adiantaram na busca pela sustentabilidade energética com foco no desenvolvimento social, como os programas Palmas Solar no Tocantins (PREFEITURA DE PALMAS, 2015) e Goiás Solar (GOVERNO DE GOIÁS, 2017), que oferecem incentivos e facilidades para a adoção da energia solar FV e o desenvolvimento desse mercado.

Um grande avanço ocorreu no ano 2020 com a publicação pelo Governo Federal da Resolução n.º 69, de 16 de julho, que zerou os impostos de importação incidentes sobre equipamentos para geração de energia solar (ME, 2020).

Essas resoluções retromencionadas atingem especialmente os geradores distribuídos, mas existem diversos outros programas de incentivo que atendem os empreendedores do mercado de energia solar, tanto para importação e comercialização de componentes quanto para a instalação e geração de centrais FV. Entre esses incentivos estão, por exemplo: descontos para o uso dos sistemas de transmissão e distribuição, isenção de impostos e encargos, condições diferenciadas para financiamento por bancos públicos e fundos de investimentos, incentivos a projetos de pesquisa e desenvolvimento na área solar e os leilões de compra de energia (NASCIMENTO, 2017).

Além desses incentivos econômicos, no Brasil também se faz necessário outras iniciativas interdependentes, que incluem um planejamento de longo prazo que garanta segurança para o setor de energia solar, especialmente aos investidores, para que não haja uma dependência eterna dos governos. O que também exige a promoção de incentivos para o desenvolvimento de toda cadeia produtiva envolvida na tecnologia solar, inclusive de

um plano educacional que habilite profissionais de todos os níveis (CARSTENS; CUNHA, 2019).

Instituições governamentais possuem papel histórico central na dinâmica das relações em todos os níveis do sistema elétrico, especialmente no Brasil, o que impacta no desenvolvimento da tecnologia FV e determina as ações que serão tomadas em consideração ao futuro dessa fonte de energia renovável em todos os níveis de governo. Portanto, há a necessidade urgente de mais pesquisas com foco na geração de dados e informações que subsidiem o planejamento de programas voltados à produção de energia solar, considerando os benefícios ambientais, econômicos e sociais a níveis regional e nacional.

Graças aos leilões públicos de energia elétrica promovidos pelo Governo Federal, os custos envolvidos nos projetos de centrais FV chegaram a um nível bastante competitivo que culminou com a redução dos custos de investimentos e preços médios para compra de energia à valores nos mesmos patamares de outras fontes tradicionais, como a hidroelétrica.

Os dados apresentados pela MME-EPE (2018c) referentes aos leilões de 2014 a 2018 demonstram que o modelo de geração FV centralizada já pode ser considerado totalmente viável no Brasil, principalmente na região Nordeste onde se encontram a maioria das centrais FV contratadas nestes leilões.

2.4 Potencial solar nacional

Estima-se que a quantidade de energia solar que atinge a superfície terrestre seja da ordem de 10.000 vezes o atual consumo energético mundial. Essa informação serve para dar esperança de que os esforços para um maior aproveitamento da energia solar não são em vão. Muitos países estão investindo fortemente nas tecnologias de energia solar, em especial a FV, promovendo políticas e incentivos para a expansão desta tecnologia (ALAM *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2018).

Estudos mostraram que o uso de módulos solares nas áreas urbanas atuam de forma complementar às outras fontes de energia, reduzindo custos e a emissão de poluentes na atmosfera, porém ainda são usadas de forma muito tímida (WONG *et al.*, 2016).

Países com quantidades de irradiação solar muito menor que o Brasil vêm investindo muito mais em energia solar, segundo Sánchez-Lozano *et al.* (2013). A Alemanha, líder na implantação de módulos FV possui um potencial solar muito inferior aos países tropicais e outros do próprio continente onde a tecnologia já está bem estabelecida, como Portugal, Espanha, França e Itália (ALAM *et al.*, 2016; PEREIRA *et al.*, 2017).

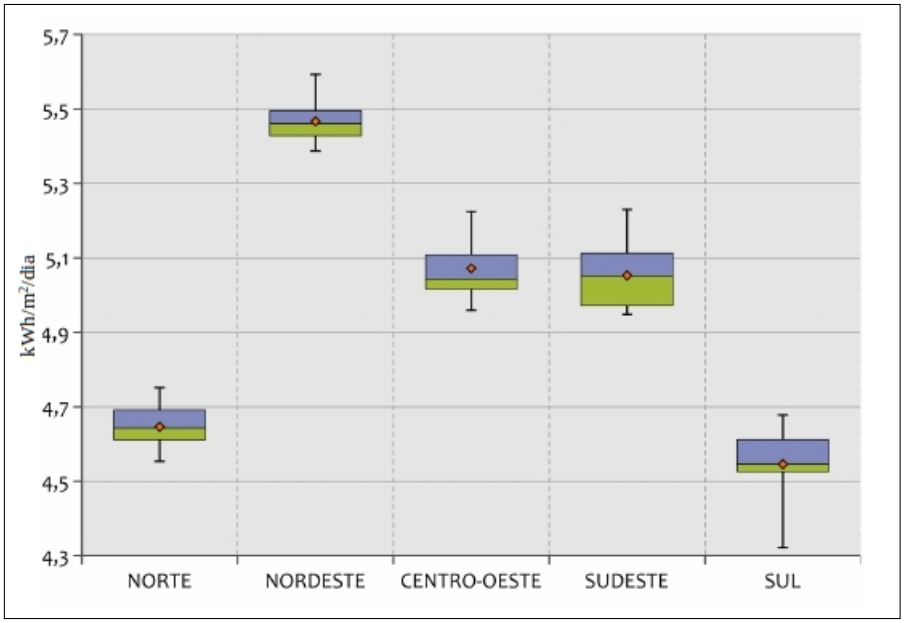
Aplicando-se os modelos mais bem sucedidos de sistema tarifário e incentivos governamentais existentes no mundo, somado ao alto nível e baixa variabilidade de irradi-

ação solar no Brasil, temos potencial para nos tornar líder mundial na geração de energia solar em poucos anos.

2.4.1 Brasil

Devido à sua posição geográfica predominantemente tropical, o Brasil possui grande disponibilidade de luz solar em toda sua extensão territorial, com destaque para a região Nordeste. Estudo recente, que mapeou os recursos solares no Brasil, apontou que a média do território brasileiro mostra um grande potencial de aproveitamento – 5,0 kWh/m^2/dia – , maior que os valores observados no continente europeu, região com muitos estudos científicos e altos investimentos públicos e privados nesta fonte de energia (Figura 6) (PEREIRA *et al.*, 2017).

Figura 6: Variabilidade das médias anuais dos totais diários de irradiação global ao longo dos anos de 2005 a 2015 para cada uma das regiões do Brasil (kWh/m^2/dia).



Fonte: Pereira *et al.* (2017)

Para um aproveitamento satisfatório da radiação solar para geração de energia elétrica, é necessário que a região possua muitas horas de irradiação direta de alta intensidade e fator de sazonalidade baixa (variação da nebulosidade), e com exceção do semiárido nordestino, todas as outras regiões brasileiras apresentam períodos com muita nebulosidade e chuvas (PEREIRA *et al.*, 2007; TIBA *et al.*, 2014; PEREIRA *et al.*, 2017).

O Brasil com sua vastidão territorial e grandes taxas de radiação solar, possui um enorme potencial de geração de energia solar (HOLDERMANN *et al.*, 2014). Um levantamento realizado e publicado no Atlas Brasileiro da Energia Solar (ABES) de 2006, e atualizado em 2017, apresentou dados da disponibilidade de energia solar no Brasil, baseado em um modelo alimentado por dados climatológicos e mais de 10 anos de informações extraídas de imagens de satélites e validados a partir de dados coletados de

estações no solo (PEREIRA *et al.*, 2017). Esses dados são corroborados por outro estudo, realizado a nível mundial, que resultou no Atlas Solar Global desenvolvido e disponibilizado gratuitamente pela companhia Solargis com o apoio do Banco Mundial (SOLARGIS, 2019).

Um estudo realizado em 2012 pela Sociedade Alemã de Cooperação Internacional em parceria com o Governo Brasileiro, mediado pela EPE, aplicou uma metodologia para mapeamento da área potencial de telhados de edificações residenciais no Brasil para fins de aproveitamento FV, e os dados apresentados mostraram um alto potencial de aproveitamento, com destaque para a região Sudeste devido ao maior número de residências em comparação às demais, e a Região Nordeste em razão da maior indicência de radiação solar. (LANGE, 2012).

Com essas informações e, considerando o vasto território e a alta irradiância solar, o Brasil tem potencial para aumentar substancialmente a geração de energia solar FV, podendo gerar dezenas de milhares de gigawatts de eletricidade por hora, contribuindo sobremaneira para a redução do uso de combustíveis fósseis e dos impactos sociais e ambientais de novas hidroelétricas, necessitando, no entanto, de uma maior valorização desta tecnologia, dando condições de competir com as tecnologias já estabelecidas (CARSTENS; CUNHA, 2019).

2.4.2 Semiárido brasileiro

O semiárido brasileiro é a região do país que reúne as melhores condições para instalação de sistemas de energia solar, devido à enorme quantidade de radiação direta de alta intensidade e fator de sazonalidade baixo, compreendendo basicamente duas estações no ano, uma seca e outra chuvosa (PEREIRA *et al.*, 2007).

Além dos níveis de radiação, outros fatores favorecem a necessidade de um maior aproveitamento do recurso solar nesta região: o fato deste recurso ser mais intenso no período seco, justamente quando há mais escassez de água para alimentar as hidroelétricas; possuir áreas com terras pouco competitivas para outros usos mais nobres, como agricultura; e a possibilidade de se tornar uma nova fonte de emprego e renda para a população desta região que, coincidentemente, possui os menores IDHM do país, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2012; TIBA *et al.*, 2014).

Mesmo considerando a grande extensão territorial do semiárido brasileiro, as estações seca e chuvosa variam entre os estados nordestinos devido às características geográficas locais, que geram microclimas específicos, e a proximidade com o oceano em alguns locais, resultando maiores índices pluviométricos (MOURA *et al.*, 2007).

De acrodo com a resolução n.º 107 de 27 de julho de 2017, que estabeleceu critérios técnicos e científicos para delimitação do semiárido brasileiro, para um município ser

incluso na região semiárida ele deve atender à pelo menos um dos seguintes critérios (SUDENE, 2017):

1. Precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm;
2. Índice de Aridez de Thorntwaite igual ou inferior a 0,50;
3. Percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano.

As áreas urbanas do semiárido brasileiro, apesar de serem de pequeno porte em sua maioria, se caracterizam, predominantemente, por construções espacialmente distribuídas e discretas, com poucos edifícios geradores de sombras, o que classifica essas áreas como de grande potencial para instalação de sistemas FV, da mesma forma que ocorre nas áreas menos urbanizadas de Hong Kong avaliadas no trabalho de Wong *et al.* (2016). Essas características garantem maior eficiência na geração de energia FV no modelo distribuído.

2.4.3 Sergipe

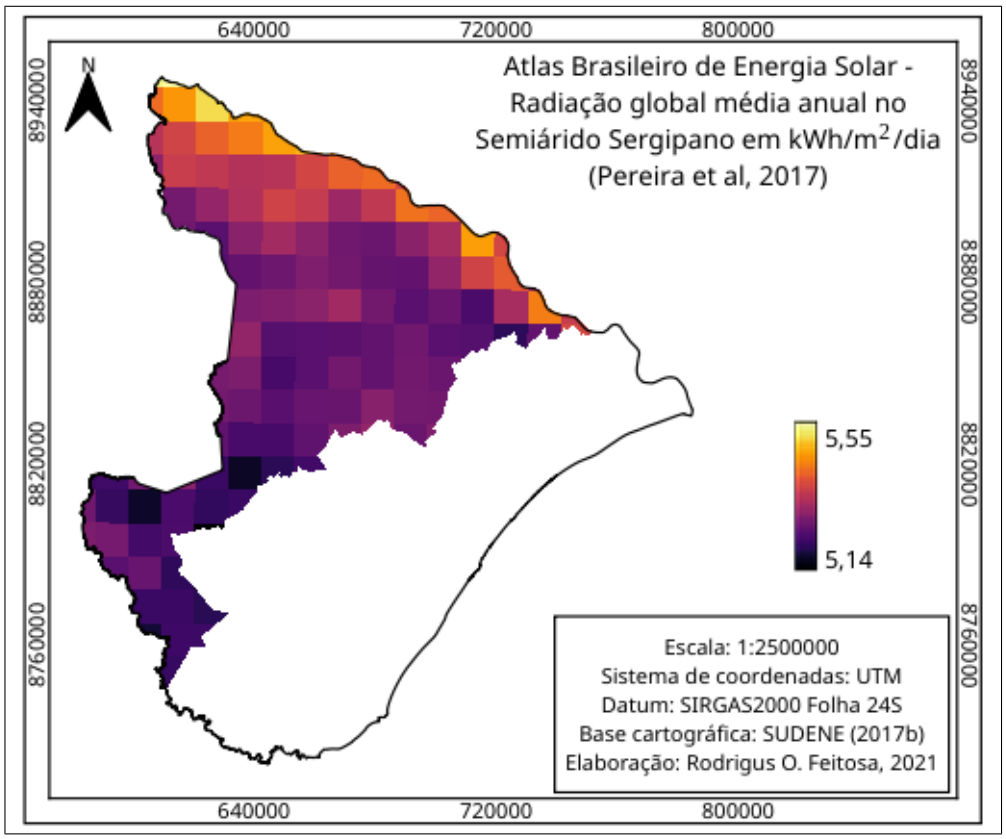
Como mencionado anteriormente, a quantidade de horas de sol em determinada área do globo terrestre depende apenas da latitude e da declinação solar. Considerando essa informação, e sabendo-se que todo o Estado de Sergipe está localizado entre 9º e 11º de latitude, sendo que sua maior proporção está na latitude de 10º. A quantidade de horas de sol no 15º dia de cada mês, indica que na maior parte do estado a variação anual é de apenas 1,2 horas de duração máxima da insolação diária, que varia entre 11,4 a 12,6 horas (PEREIRA *et al.*, 2007).

A região semiárida sergipana, onde estão inclusos 29 municípios, compreende 11.093 km^2 e 478.969 habitantes (SUDENE, 2017; IBGE, 2019). Juntamente com as regiões semiáridas baiana e alagoana, é uma das áreas com as menores variações de chuvas anuais (SANTOS *et al.*, 2017), o que indica uma região com baixa variabilidade climática. Esses dois fatores, níveis de radiação solar e baixa nebulosidade, são os principais pré-requisitos para a viabilidade técnica de sistemas de geração de energia solar de baixa concentração ou plano, o que caracteriza os sistemas FV (TIBA *et al.*, 2014).

Dados do ABES mostram que no semiárido sergipano a radiação solar global média anual pode variar entre 3,8 e 6,6 kWh/m^2/dia, com uma média de 5,3 kWh/m^2/dia (figura 7), o que demonstra um grande potencial solar da região (PEREIRA *et al.*, 2017).

Segundo dados do Anuário Estatístico da Energia Elétrica de 2020 ano base 2019, a capacidade de geração elétrica instalada em Sergipe era de 1.707 MW, praticamente inalterada desde o ano 2013. E a quantidade de energia elétrica gerada naquele ano foi de 4.186 GWh. Juntamente com Alagoas, foram os únicos estados do Nordeste que tiveram

Figura 7: Radiação global média anual no semiárido sergipano.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Pereira *et al.* (2017)

redução na produção em comparação ao ano 2013. Em 2019, o consumo total em Sergipe foi na ordem de 3.705 GWh, sendo que o setor residencial foi responsável por 32,7% desse total, ainda que este setor represente 90,0% de todas as unidades consumidoras (MME-EPE, 2020a). E, considerando a população estimada para o ano 2019, o consumo médio per capita em Sergipe foi de 1.612 kWh/hab/ano, pouco acima da média para o Nordeste que foi de 1.465 kWh/hab/ano (IBGE, 2019).

Em Sergipe existem três centrais elétricas de serviço público que representam 98,65% da capacidade instalada no estado (MME-EPE, 2020a), a Usina Hidroelétrica de Xingó com uma potência instalada de 3.162 MW, operada pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) (CHESF, 2021), o Parque Eólico da Barra dos Coqueiros composta por 23 aerogeradores e uma potência instalada de 34,5 MW, operada atualmente pela norueguesa Statkraft (STATKRAFT, 2021) e a Usina Termoelétrica Porto de Sergipe I com potência instalada de 1.551 MW, composta de três turbinas geradoras à gás natural e uma a vapor, operada pelo consórcio Centrais Elétricas de Sergipe S.A. (CELSE, 2021).

As principais metas do governo brasileiro para a energia FV são o desenvolvimento de uma indústria de módulos solares nacional e o aumento da capacidade de geração elétrica FV. As estimativas dos órgãos de energia governamentais são de que até o ano de 2024 a quantidade de sistemas FV residenciais instalados sejam de aproximadamente 808.000 unidades, o que representa um grande crescimento para o mercado de geração

distribuída (CARSTENS; CUNHA, 2019).

O desenvolvimento do mercado de energia solar é fortemente dependente da política, desenvolvimento e transferência de tecnologia, economia dos produtos de energia solar e dos recursos locais de energia solar. É necessário integrar todos esses fatores influenciadores para analisar o potencial da energia solar como uma fonte para produção de eletricidade e planejar sua exploração em escala local.

3 Benefícios além do ambiental

Muito além dos benefícios ao meio ambiente já apresentados, a transição para uma fonte de energia limpa e renovável pode trazer consigo um potencial não apenas tecnológico, mas também social. A adoção da tecnologia FV pode contribuir em termos sociais e econômicos, ao passo que cria novas oportunidades de emprego, renda e desenvolvimento econômico, especialmente para a população local (CARSTENS; CUNHA, 2019).

A implantação de sistemas centralizados de energia FV podem produzir efeitos colaterais benéficos à sociedade local, ao melhorar as infraestruturas e aparelhos públicos necessários para seu funcionamento, como a malha viária e a rede elétrica, construção de novas subestações, criação de novos empregos durante a construção e para a subsequente manutenção. (SÁNCHEZ-LOZANO *et al.*, 2013).

Alam *et al.* (2016) ainda vai além, e inclui nesta lista o benefício político, pois na categoria econômica, além dos empregos e renda, há a possibilidade de venda da energia excedente a partir da geração distribuída e local, aumentando por conseguinte a segurança e autonomia energética na categoria política, encorajando o cidadão e a comunidade no engajamento em atividades de proteção ambiental (Quadro 2).

Assim, observou-se que existe uma conexão entre as categorias econômica, social, ambiental e política para criar uma urbanização sustentável, onde haja uma relação equilibrada entre agentes sociais, econômicos e ambientais.

Quadro 2: Benefícios da energia elétrica FV.

Categoria	Benefícios
Econômicos	Criação de empregos
	Impulsiona o desenvolvimento econômico
	Cria condições estáveis para crescimento do mercado
Sociais	Distribuição de riquezas mais justa e empoderamento dos cidadãos e comunidades
	Aumento do apoio público às energias renováveis pela participação direta
	Encorajamento dos cidadãos e comunidades no engajamento em atividades de proteção ambiental
	Tornar as energias renováveis parte comum da paisagem e do espaço da cidade
Ambientais	Aplicação na dessalinização e bombeamento de água
	Incentivar medidas de eficiência energética
	Reduzir a dependência dos combustíveis fósseis
	Reduzir as emissões de carbono e poluentes
Políticos	Demonstrar compromisso com a implantação de energias renováveis
	Criar mecanismos para alcançar metas de energia renovável e redução de emissões
	Aumentar o interesse das partes envolvidas, apoiando as políticas de energias renováveis
	Aumentar a segurança e autonomia energética

Fonte: Adaptado de Alam *et al.* (2016).

Diante deste quadro é possível enumerar uma relação com pelo menos oito dos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU):

a) ODS 1 - Erradicação da pobreza;

b) ODS 6 – Água potável e saneamento;

c) ODS 7 - Energia limpa e acessível;

d) ODS 8 - Trabalho decente e crescimento econômico;

e) ODS 9 - Indústria, inovação e infraestrutura;

f) ODS 10 - Redução das desigualdades;

g) ODS 11 - Cidades e comunidades sustentáveis;

h) ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima.

A implantação da tecnologia FV em uma região carente de políticas públicas e rica em recursos solares como o semiárido brasileiro, cria uma grande oportunidade de

transformação ambiental, política e socioeconômica, especialmente para a população de baixa renda.

3.1 Energia elétrica como direito social

O Estado e os cidadãos devem enxergar os incentivos públicos não como favor, contrapartida ou caridade, mas como uma atuação positiva do Estado na concessão de direitos sociais, contribuindo com as demandas que contemplam o mínimo existencial.

Mínimo Existencial é um conceito teórico construído pela doutrina jurídica internacional, não é algo que está descrito ou definido em qualquer código legal. Não existe unanimidade acerca deste tema, mas diversas definições doutrinárias têm em comum que o conceito de mínimo existencial está relacionado com prestações materiais por parte do Estado que garantam a qualquer indivíduo, condições mínimas para uma vida condigna (MATSUDA *et al.*, 2011; SARLET; ZOCKUN, 2016).

Embora a energia elétrica contribua para a melhoria da qualidade de vida do indivíduo, não é algo imprescindível à sua dignidade, conforme preconiza o conceito do mínimo existencial, e, neste caso, o Estado poderia condicionar a sua exigibilidade à existência de recursos financeiros públicos suficientes à sua efetivação.

Mas para diversos autores (SGARBOSSA, 2010; WEBER, 2013; SARLET; ZOCKUN, 2016), o mínimo existencial não deve ser confundido somente com a garantia de condições mínimas vitais ou de sobrevivência biológica, mas que também assegurem a inserção do indivíduo de forma digna na vida social, política e cultural. Assim, os autores expandem o conceito doutrinário para um Mínimo Existencial Sociocultural, pois a dignidade implica uma dimensão sociocultural, que inclui o efetivo exercício da cidadania.

Assim, como o Estado reservou para si a titularidade dos serviços públicos, ele deve envidar esforços para a promoção de políticas públicas para melhoria do bem-estar social, inclusive pelo fornecimento de eletricidade. Como ressaltou Gabardo (2009, p. 178), “ao estado de bem-estar, como atividade que lhe é própria, responsabiliza-se pelo incremento civilizatório da sociedade, protegendo os indivíduos em face da possibilidade de retrocesso sociocultural, socioeconômico e socioambiental”

Até o Papa Francisco, na Carta Encíclica Laudato Si’, publicada em 2015, escreve sobre os cuidados com o que ele chama de "casa comum", ou seja, o planeta Terra. Ele afirmou que a necessidade de energia não deve destruir a civilização, tanto do ponto de vista ambiental quanto social. E que, para reduzir as desigualdades sociais, todos deveriam ter acesso à energia elétrica limpa e sustentável, contribuindo também para o futuro das próximas gerações (FRANCISCO, 2015).

3.2 Potencial solar e desenvolvimento social

O uso do Sol como fonte de energia pode significar uma possibilidade de transformação socioeconômica para populações de baixa renda do semiárido nordestino, tanto pela produção elétrica distribuída, quanto pela geração de empregos. Algo que pode virar realidade por meio das políticas públicas voltadas à promoção do desenvolvimento econômico regional e programas de incentivos à eficiência energética.

As possibilidades de aproveitamento social da energia solar são interessantes, como ressalta Pereira *et al.* (2017, p. 12):

> "Uma estratégia de aproveitamento da geração solar consorciada com a geração hidroelétrica permite antever um possível processo de aumento da renda de algumas das regiões mais pobres do país, como a Região Nordeste, com a promoção de uma economia socialmente justa e menos vulnerável aos efeitos do clima, reduzindo assim uma assimetria regional secular de inclusão social e econômica".

O Governo Federal, mediante políticas de eficiência energética, adotou por anos a obrigatoriedade do uso de tecnologias de energia solar térmica para aquecimento de água em programas de habitação de interesse social, objetivando economia energética e melhoria da qualidade de vida dos moradores (CRUZ, 2016). Esse tipo de tecnologia solar tem finalidade discutível para aplicação no semiárido nordestino, região de altas temperaturas onde o aproveitamento para geração de energia elétrica pode ser mais vantajoso social e economicamente do que para aquecimento de água para banho.

Em 2017, o Governo Federal, por intermédio do antigo Ministério das Cidades, atual Ministério do Desenvolvimento Regional, publicou a Portaria n.º 643/2017, dispondo sobre as condições gerais para o uso de sistemas alternativos de energia para empreendimentos do Projeto Minha Casa Minha Vida, tornando o uso de energia solar FV uma realidade em nível nacional para projetos habitacionais de interesse social (MCID, 2017).

Um projeto em Juazeiro, no sertão baiano, serve de exemplo do uso da tecnologia FV mesmo antes dessa publicação. Lá existe um projeto para melhoria da qualidade de vida de beneficiários de programas de habitação popular pela instalação de micro usinas para geração distribuída de energia solar em telhados residenciais, resultando em descontos na conta de energia ou renda com a venda do excedente de produção (TRINDADE, 2013).

No Piauí, a Universidade Federal do Piauí, por intermédio do Departamento de Engenharia Elétrica, implementou o Projeto "Canindé Solar"que se destina ao bombeamento de água com o uso de energia solar para beneficiar comunidades que vivem da agricultura familiar no semiárido. Além do fornecimento de água para a agricultura, o projeto também visa a capacitação tecnológica dos beneficiários (UFPI, 2019).

É de extrema importância a geração e disponibilização de dados e informações confiáveis sobre os recursos solares disponíveis aos órgãos governamentais e não-governamentais, investidores e empresas ligadas ao setor de energia que lhes permitam avaliar os riscos associados aos fatores climáticos e ambientais envolvidos em projetos de utilização de fontes de energias alternativas. O que nos leva a pensar em meios mais ágeis e confiáveis para gerar dados e informações que auxiliem no planejamento para melhor aproveitamento do potencial solar, e é aí que a tecnologia da informação e a geotecnologia assumem papel essencial.

4 Geoinformática para Análise Solar

A geoinformática é um dos termos usados para descrever as atividades que envolvem a manipulação de informações geográficas digitais por meio de computadores. De modo mais amplo, podemos conceituar a geoinformática ou geomática, como alguns preferem se referir, como a disciplina que reúne práticas, métodos e tecnologias que permitem coletar, analisar e divulgar dados geográficos. O objetivo final da geoinformática é a representação espacial dos dados coletados para identificar, representar e demonstrar os resultados das análises estatísticas (CÂMARA *et al.*, 2001).

Logicamente esse termo vem da contração dos termos geografia e informática, que envolve todas as tecnologias empregadas nesse ramo do conhecimento, as geotecnologias que incluem primordialmente: SIG, sensoriamento remoto e bases de dados georreferenciados.

4.1 Geotecnologias

É importante destacar a diferença entre duas geotecnologias associadas à análise da radiação solar, SIG e sensoriamento remoto, para que fique mais claro a compreensão de seu funcionamento.

O sensoriamento remoto tornou possível a coleta de dados e informações sobre o "mundo"físico, detectando e medindo sinais compostos de radiação, partículas e campos que emanam de objetos localizados além do alcance físico direto do dispositivo sensor, e é comumente realizado com o auxílio de satélites geoestacionários, balões, aeronaves e veículos aéreos não tripulados, genericamente chamados de drones (SHORT, 2009).

Resumindo, sensoriamento remoto é o processo no qual dados são coletados por sensores sem contato físico com o alvo da coleta, e esses dados servem para alimentar os SIG que os processam e geram novas informações. Essas tecnologias associadas possibilitam a realização do gerenciamento ambiental de grandes áreas sem a necessidade de observações *in loco* e sem limitações espaciais.

4.2 Sistemas de informações geográficas

De acordo com Burrough e McDonnel (1998), um SIG é um sistema baseado em computador que provê um conjunto de técnicas implementadas para lidar com dados espacialmente referenciados (ou georreferenciados), capaz de preparar, manipular, armazenar, analisar e apresentar esses dados, objetivando simular situações e contextos existentes no

mundo real. E os dados georreferenciados devem possuir quatro características indissociáveis: a) uma posição geográfica; b) atributos associados; c) relações topológicas, e; d) uma referência temporal. Simplificando, um SIG é composto por: dados com informações georreferenciadas e um software para seu processamento e análises.

A potencialidade das ferramentas SIG se destaca na análise geográfica para o planejamento estratégico de novos empreendimentos e na simulação de cenários de oferta e demanda com diferentes possibilidades tecnológicas. No campo das energias renováveis podem auxiliar de três maneiras: no apoio a decisões para integração regional das fontes de energia, na avaliação das fontes de energia para geração distribuída e na avaliação de sistemas de geração descentralizada de eletricidade (DOMINGUEZ; AMADOR, 2007). O SIG oferece ao grupo tomador de decisões, a possibilidade de realizar a análise, gerenciamento, armazenamento e visualização de todas as informações geoespaciais de uma área de interesse.

Desde que foram criados, os SIG têm sido usados em inúmeros estudos de planejamento territorial, tais como planejamento urbano e infraestrutura urbana. O trabalho pioneiro resultante da combinação de SIG e energias renováveis foi publicado por Broesamle *et al.* (2001), onde o sistema foi utilizado para a identificação de locais ideais para a instalação de centrais de energia solar concentrada na região Norte da África, classificando os locais em relação ao potencial solar e custo da eletricidade solar térmica para um modelo particular de usina.

Como todo sistema computacional, entre os SIG existentes, alguns são de código fechado ou proprietário, que são protegidos por direitos autorais e comercializados sob uma licença de uso, a exemplo do famoso ArcGIS do desenvolvedor ESRI. E também existem vários SIG que são disponibilizados com código aberto e livres para serem utilizados e até modificados sem custos, a exemplo do QGIS (antigo QuantumGIS) e do Sistema de Suporte à Análise de Recursos Geográficos (em inglês, Geographic Resources Analysis Support System, GRASS). Apesar de gratuitos, os SIG de código aberto possuem funcionalidades e qualidades muito próximas dos sistemas de código fechado, tanto que o QGIS e o GRASS são amplamente utilizados por agências governamentais, empresas de consultoria ambiental e pela academia (OSGEO, 2018).

4.3 Dados raster e vetor

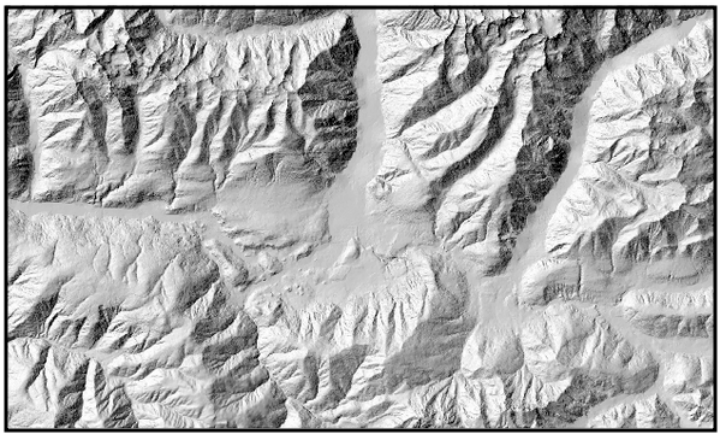
Os dados processados por um SIG se apresentam em dois formatos primários: vetorial e matricial ou, como este é mais conhecido, raster. No formato raster a paisagem é representada em uma estrutura de células de grade. Enquanto que no formato vetorial, os elementos da paisagem permitem descrever posição e direção.

Um mapa raster é uma camada de dados que consiste em uma matriz de células

que contém um certo número de linhas e colunas. Cada célula recebe um valor numérico ou textual (ou um indicador nulo) que representa uma condição da área coberta por essa célula. As células da matriz também são chamadas de pixels, e são a unidade mínima de mapeamento, o que significa que é o menor tamanho com que qualquer característica da paisagem pode ser representada. O tamanho do pixel é determinado pela capacidade de resolução óptica do sensor remoto (OSGEO, 2018).

Dados raster são utilizados quando precisamos exibir informações contínuas de determinado espaço geográfico e que não possa ser facilmente representado por funções vetoriais, como por exemplo dados do relevo (Figura 8). Muitas informações do terreno seriam perdidas no processo de simplificação da paisagem com a utilização de linhas e polígonos.

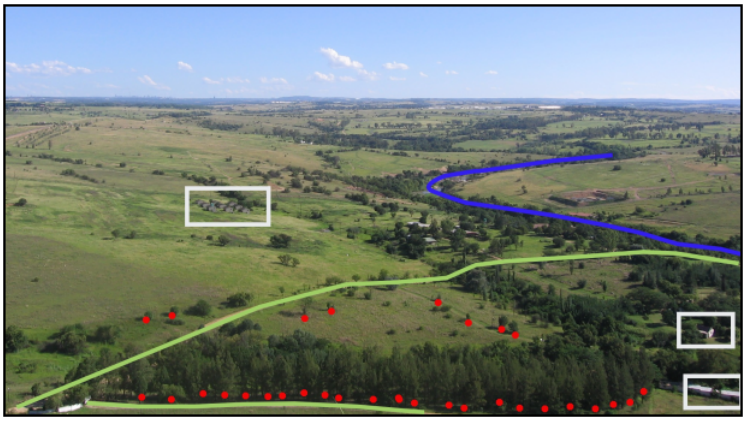
Figura 8: Exemplo de mapa raster.



Fonte: OSGeo (2019)

O mapa vetorial é uma camada de dados que consiste em um número de características esparsas no espaço geográfico. Essas características ou feições são representadas em formas geométricas, que são pontos, linhas ou polígonos, como por exemplo: árvores, rios, estradas, casas, etc. (Figura 9). Um mapa vetorial também pode representar estruturas em três dimensões, armazenando atributos de altura, por exemplo de edificações. Cada feição no mapa está relacionada a um conjunto de atributos armazenados em um banco de dados, que consiste de valores textuais ou numéricos que descrevem suas características (nome de rios, área das edificações, fonte dos dados, etc.) (OSGEO, 2019).

Figura 9: Exemplo de mapa vetorial.



Fonte: OSGeo (2019)

4.4 Modelos solares

Um modelo de radiação solar é um modelo físico elaborado a partir de equações empíricas para prover uma estimativa rápida e apurada de radiação solar, considerando os efeitos da elevação, inclinação, aspecto e sombreamento do ambiente circundante (WONG *et al.*, 2016). Alguns modelos solares desconsideram os efeitos da nebulosidade para simplificação, uma vez que este é um fator com previsibilidade bastante baixa.

No ano 2000, Christelle *et al.* (2000) elaboraram um modelo solar para céu claro (sem nebulosidade), desenvolvido no âmbito do Atlas Europeu de Radiação Solar (ESRA). Este modelo, chamado de Modelo ESRA, é descrito e analisado com o objetivo principal de ser usado para estimar a radiação solar ao nível do solo a partir de imagens de satélite, considerando a turbidez atmosférica e a elevação do terreno. A inclusão dessas duas variáveis nos cálculos, permitiram melhores resultados em termos de robustez e precisão nas estimativas, especialmente em escalas menores.

No Brasil, Martins *et al.* (2005) fizeram uma avaliação dos recursos de energia solar e eólica no decorrer do Projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment). Para elaboração dos mapas de radiação solar foi utilizado o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em parceria com o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina. Desse projeto resultou o ABES publicado em 2006 (PEREIRA *et al.*, 2006) e atualizado em 2017 (PEREIRA *et al.*, 2017).

As etapas de validação e a comparação com outros modelos de transferência radiativa demostraram que as estimativas alcançadas são de grande confiabilidade e obtiveram desempenho similar aos outros modelos em uso para aplicações em pesquisas e no levantamento de recursos solares.

Atualmente as bases de dados e serviços regionais brasileiros proveem somente

estimativas aproximadas do potencial energético solar baseadas em valores médios (PEREIRA *et al.*, 2017). Enquanto que dados médios de radiação solar oferecem valores aproximados da disponibilidade de energia solar, estimativas em escalas locais podem desviar significativamente da tendência geral. Por isso é de suma importância a utilização de ferramentas e métodos adequados para a produção de informações à respeito do potencial solar em escala local e temporal, considerando as particularidades físicas e climáticas de cada região do país.

A medição da radiação solar pode ser feita por estações meteorológicas em terra, que aplicadas técnicas de interpolação pode-se criar bancos de dados espaciais. Isso também pode ser obtido a partir de satélites meteorológicos geoestacionários, inclusive para áreas montanhosas, mas somente com essa técnica, os dados resultantes possuem uma menor acurácia quando comparados com os dados medidos em terra (HOFIERKA; ŠÚRI, 2002).

Uma outra técnica que gera dados espaciais são os modelos de radiação solar integrados com SIG que eliminam a complexidade da programação das funções do SIG em modelos matemáticos, fornecendo uma computação rápida e precisa da radiação em grandes áreas considerando o efeito da geografia local (NGUYEN; PEARCE, 2010).

4.5 SIG para estimativa de energia solar

Em razão do vasto território e dos custos dos equipamentos para medição direta da radiação solar, não é possível manter uma rede solarimétrica no Brasil, algo que só ocorre de forma mais regular em instituições e centros de pesquisa. Por conseguinte, para realizar a aferição em maior escala, mesmo regional, é necessário o uso de outros meios de medição indireta, como as tecnologias de sensoriamento remoto.

O uso de produtos de sensoriamento remoto permite a mensuração de forma confiável, e o avanço de novas tecnologias na última década trouxeram uma precisão significativa. Para o tratamento e manipulação desses produtos, os pesquisadores utilizam os SIG, que começaram a serem usados em 1990 para pesquisas em energias renováveis, quando foram desenvolvidas ferramentas específicas para essa área de estudo (TIBA *et al.*, 2014).

Diversos trabalhos já comprovaram a viabilidade técnica do uso de SIG para avaliação do potencial solar, especialmente pela capacidade de análise em escalas local e temporal, auxiliando sobremaneira no planejamento da infraestrutura para aproveitamento do recurso solar (CHOW *et al.*, 2014; PINTOR *et al.*, 2015; HULD, 2017). A modelagem, o mapeamento e a previsão de potencial solar são importantes mecanismos para aumentar a capacidade de avaliação do uso de energias renováveis e de suporte ao planejamento.

4.5.1 Avanços dos SIG para energia solar

Desde as primeiras pesquisas aplicando SIG para as energias renováveis, várias ferramentas novas e mais avançadas foram desenvolvidas para fazer análise do potencial solar a partir de dados cartográficos, imagens de satélites, fotografias aéreas, etc.

Atualmente os sistemas ArcGIS e GRASS, possuem ferramentas para análise solar, que são respectivamente o Solar Analyst e o módulo GRASS r.sun com resultados bastante precisos (GONÇALVES *et al.*, 2015). E existe o Photovoltaic Geographic Information System (PVGIS), desenvolvido especificamente para estimar o potencial de geração de eletricidade de módulos FV e funciona como um serviço na Internet (WONG *et al.*, 2016).

Uma tecnologia mais recente que está revolucionando as pesquisas de estimativa de potencial solar em áreas urbanas é a Light Detection And Ranging (LiDAR), que utiliza um feixe de laser para medir a luz refletida por um ponto distante a fim de obter sua distância e, assim, criar um MDS, inclusive em três dimensões, com muito mais precisão que os MDE elaborados a partir de imagens de satélite (REDWEIK *et al.*, 2013). Com esse método é possível analisar as nuances da cobertura do terreno, o que inclui o topo da vegetação, as edificações urbanas e suas interações.

Para lidar com grandes quantidades de dados em escala urbana, é necessário encontrar um bom equilíbrio entre velocidade no processamento dos dados e precisão dos resultados, o que exige a escolha de produtos de sensoriamento remoto com resolução espacial adequada aos propósitos da pesquisa. Pois, como escreveu Quan *et al.* (2015), as análises com SIG utilizando modelos em 3D de ambientes urbanos ou baseadas em dados/imagens de tecnologia LiDAR focados na precisão, exige muito tempo e capacidade tecnológica de processamento computacional, o que também foi mencionado por Lange (2012) e diversos outros autores.

4.5.2 Onde e como já foi usado

Os procedimentos de avaliação e identificação de localidades utilizando SIG estão inovando os mecanismos de tomada de decisão vêm contribuindo decisivamente para o rápido crescimento da implantação de empreendimentos de energia solar, desde o trabalho pioneiro de Broesamle *et al.* (2001), que concluiu que o sistema se mostrou útil na geração de dados e informações importantes para que projetistas, governos e instituições intergovernamentais e demais tomadores de decisões tenham um boa base para planejamento de instalações de energia solar no mundo.

Em 2005, o Projeto SWERA promoveu uma avaliação geral dos recursos solares e eólicos da América do Sul, em especial do Brasil. Como resultado final gerou o primeiro atlas brasileiro de energia solar (MARTINS *et al.*, 2005; PEREIRA *et al.*, 2006).

Em um projeto implementado na União Europeia em 2007, o REGIS, um primeiro estágio utilizou o SIG como um instrumento de planejamento energético regional, onde foram identificadas áreas potenciais para tecnologias de energias renováveis, determinando os efeitos socioeconômicos e ambientais do projeto. Ao final deste primeiro estágio do projeto, cada região participante possuía sua base georreferenciada para planejamentos e projetos futuros (DOMINGUEZ; AMADOR, 2007).

Na cidade de Florianópolis, na região sul brasileira, em 2009 foi publicado o resultado de uma pesquisa de Santos e Rüther (2009) sobre a avaliação das características das coberturas residenciais para aproveitamento da energia solar FV com a aplicação de uma metodologia para cálculo do potencial e empregando um SIG para analisar a inclinação e orientação dos telhados residenciais.

Souza *et al.* (2011) utilizaram SIG para avaliação de equações estatísticas para estimativas de geração de energia solar a partir de dados anuais e mensais das componentes da radiação solar incidentes em superfícies inclinadas.

Em 2013, Redweik *et al.* (2013) propuseram um método para calcular o potencial solar incidente nos telhados e fachadas dos edifícios de forma conjunta com o uso de SIG e imagens LiDAR para elaboração de um MDS. Também nesse ano, Sánchez-Lozano *et al.* (2013) publicaram trabalho sobre a utilização de um método combinado de tomada de decisão multicritério com uma ferramenta SIG para a avaliação de locais ideias para instalação de centrais de energia solar FV na região de Cartagena, na Espanha. E Sun *et al.* (2013) elaboraram um estudo em duas fases, para analisar o potencial solar de uma área com um SIG e em seguida avaliar a viabilidade econômica de um sistema solar ali instalado.

Em 2014, Tiba *et al.* (2014) apresentaram os resultados de sua pesquisa sobre um estudo de localização para centrais termosolares de grande porte no estado de Minas Gerais, Brasil. No mesmo ano, Chow *et al.* (2014) criaram um modelo no ArcGIS para computar e replicar o processo de modelagem e mapeamento solar por hora em um ano simulado. Essa pesquisa avaliou o potencial solar de toda a área de um bairro e não das construções em particular, focando nas mudanças necessárias no leiaute das construções para melhoria do potencial.

Wong *et al.* (2016) aplicaram tecnologias de sensoriamento remoto e SIG para estimativa do potencial FV de uma cidade em Hong Kong. A extração e filtragem de pixels baseada em um conjunto de critérios foram usadas para identificar telhados ótimos para módulos FV. Os resultados da pesquisa permitiram uma estimativa espacial detalhada do potencial de energia solar da cidade, subsidiando processos de decisão política no uso de energias renováveis em Hong Kong.

Huld (2017) apresentou um trabalho sobre mapeamento e estimativa do poten-

cial solar e desempenho de módulos FV sobre grandes áreas geográficas, utilizando um conjunto de ferramentas computacionais já validadas na literatura científica.

Azevêdo *et al.* (2017) realizou um estudo para a localização de usinas termossolares no Estado de Pernambuco usando tecnologias de geoprocessamento e análise de múltiplos critérios.

Silva *et al.* (2019) publicou uma pesquisa sobre o uso de sensoriamento remoto e SIG na estimativa de variáveis do balanço de energia no estudo da evapotranspiração de culturas na região semiárida brasileira.

Reginato (2020) também publicou uma pesquisa sobre a aplicação do sensoriamento remoto para identificação do potencial solar em escala regional, tendo como área de estudos a cidade de Florianópolis, no estado de Santa Catarina, Brasil.

Mediante a aplicação das tecnologias de geoprocessamento, é possível trabalhar o planejamento urbano e energético de modo que comunidades possam potencialmente ter a oportunidade de tornarem-se autossustentáveis, gerar renda para sua população e aliviar a grande demanda de eletricidade atualmente requerida da infraestrutura de transmissão e distribuição, possibilitando melhoria das condições socioeconômicas.

A expansão do uso da energia FV no Brasil não depende somente de iniciativas tecno-econômicas, mas também de um mercado aberto e competitivo, do desenvolvimento da indústria nacional adaptando a tecnologia às condições locais, da educação formal para criar mão de obra especializada, e, principalmente, da disseminação do conhecimento para a população sobre essa fonte de energia, promovendo a criação de redes de cooperação que estimulem a estruturação do mercado e a expansão da indústria. Todo esse movimento tem a possibilidade de gerar impactos positivos em indicadores de educação, taxas de emprego e desempenho econômico (CARSTENS; CUNHA, 2019).

4.6 Aplicativo GRASS

O GRASS é um SIG gratuito e de código aberto que vem sendo desenvolvido e aperfeiçoado desde 1982 pela parceria entre diversas universidades, agências governamentais e empresas privadas dos Estados Unidos. Desde o início, seu objetivo foi auxiliar no gerenciamento do terreno e planejamento ambiental. Ele é empregado para o gerenciamento e análise de dados geoespaciais, processamento de imagens, gráficos e produção de mapas, modelagem espacial e visualização em três dimensões por diversas universidades e órgãos governamentais, tais como Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA), Administração Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA), Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e INPE. (OSGEO, 2018).

Seu formato livre, permite que qualquer programador seja capaz de desenvolver

funcionalidades extras que podem ser anexadas ao sistema. Esses módulos podem ser codificados em diversas linguagens de programação tais como: C, C++, Python, Shell Script, etc. Essa característica permitiu ao longo de sua existência o desenvolvimento de mais de 350 módulos capazes de manipular dados raster e vetoriais, processar dados de imagens multiespectrais de satélites e criar, gerenciar e armazenar dados espaciais. Outra excelente possibilidade é a criação de códigos de programação para automatização de processos que executados individualmente, seriam bastante extenuantes.

O envolvimento da comunidade no aperfeiçoamento do GRASS o tornou uma poderosa ferramenta com uma ampla gama de aplicações em diversas áreas da pesquisa científica, como, por exemplo, a estimativa do potencial solar FV com o módulo r.sun (NGUYEN; PEARCE, 2010; HULD, 2017).

Para o processamento do r.sun é necessário o pré-processamento dos dados de entrada pelos módulos r.slope.aspect e r.horizon, que serão explicados à diante, bem como a obtenção dos parâmetros relacionados ao vapor d'água em suspensão e a nebulosidade, referentes aos efeitos atmosféricos. O uso combinado do GRASS r.sun com esses outros módulos nos possibilita gerar dados confiáveis sobre os componentes da radiação solar de determinada região.

4.6.1 Módulo r.sun

O módulo de análise solar r.sun foi implementado no GRASS por Hofierka e Šúri (2002), e é baseado no Modelo ESRA, o qual estima a radiação solar para condições de céu próximas das reais, considerando a turbidez atmosférica e a elevação do terreno.

O módulo de análise solar GRASS r.sun calcula as três componentes da radiação solar: direta, difusa e refletida pela superfície, e, a partir dessas, calcula a radiação global. Já foi utilizado com sucesso por diversos pesquisadores (NGUYEN; PEARCE, 2010; PINTOR *et al.*, 2015; GONÇALVES *et al.*, 2015; HULD, 2017).

Os pontos fortes desse módulo são:

1. Considerar os efeitos da topografia na radiação solar incidente;
2. O uso de dados raster como entrada o torna altamente escalável;
3. O código fonte aberto permite a contribuição colaborativa de outros pesquisadores;
4. Sua implementação no SIG GRASS permite integrar dados espaciais e não espaciais, além de fornecer uma ampla variedade de ferramentas de pré-processamento, processamento e análise.

Para o cálculo da radiação solar são considerados diversos parâmetros referentes a: efeitos atmosféricos (turbidez atmosférica e nebulosidade); latitude, elevação, declividade e

orientação do terreno; mudanças diárias e sazonais do ângulo de incidência dos raios solares (declinação solar); horas de insolação; efeitos de sombreamento causados pela topografia circundante; a radiação extraterrestre; os horários do alvorecer e do crepúsculo; e o albedo da superfície (HOFIERKA *et al.*, 2007a).

O módulo funciona de dois modos: no primeiro modo, calcula-se, para determinada hora local, o ângulo de incidência solar (em graus) e valores de irradiância solar (W/m^2). No segundo modo, somas diárias de radiação solar (Wh/m^2/dia) são calculadas dentro de um dia definido. A esse segundo modo é possível aplicar um algoritmo para gerar mapas mensais, sazonais, anuais, etc. (HOFIERKA *et al.*, 2007a).

A análise solar de uma ferramenta SIG nos permite modelar, mapear e analisar a radiação solar sobre uma área geográfica em janelas de tempo específicas, levando em consideração os efeitos da atmosfera, latitude, elevação, inclinação das superfícies, orientação do terreno, posição do Sol diariamente e sazonalmente, e efeitos de sombras lançadas pela topografia e construções circundantes. Desta forma podemos obter informações importantes para o planejamento do uso da energia solar em qualquer região do planeta.

4.6.2 Módulo r.slope.aspect

Este módulo gera principalmente mapas raster de declividade e orientação azimutal, mas também pode produzir mapas de curvatura e derivações parciais do terreno, a partir de um mapa raster de valores reais de elevação ou MDE. Os valores de declividade podem ser obtidos em graus ou porcentagem. O mapa de orientação gerado indica a direção para onde as declividades do terreno estão voltadas, considerando o sentido anti-horário a partir do Leste (0 grau), ou seja, 90º é o Norte, 180º é o Oeste, 270º é o Sul. A orientação zero indica áreas planas com zero grau de inclinação (SHAPIRO; WAUPOTITSCH, 2018).

O único parâmetro de entrada é o MDE, com valores reais, sem ter sofrido alterações de escala ou que seus dados tenham sido categorizados, e a unidade de medida vertical (elevação) deve ser a mesma que a unidade de medida horizontal.

4.6.3 Módulo r.horizon

O principal objetivo deste módulo é analisar o sombreamento na paisagem gerado pelo relevo e elementos da paisagem urbana. O r.horizon calcula a altura do ângulo do horizonte a partir de um MDE, e possui dois modos de operação: um ponto no terreno ou todos os pontos do terreno. No primeiro modo, os dados resultantes são uma série de alturas de horizonte nas direções especificadas a partir de um ponto único no terreno. No segundo modo, o processamento irá resultar em um ou vários mapas raster, e funciona

semelhante ao modo de ponto único, com a diferença de que neste, o módulo irá calcular automaticamente a altura do horizonte para cada ponto do terreno. As direções são dadas como ângulos azimutais (graus). Da mesma forma que o módulo r.slope.aspect, considera-se o leste como zero grau, e se desloca em sentido anti-horário. Os cálculos levam em consideração a projeção do mapa de entrada, e as direções são então alinhadas às da projeção geográfica e não ao sistema de coordenadas dado pelas linhas e colunas do mapa raster de entrada (HOFIERKA *et al.*, 2007b).

Os principais parâmetros de entrada são o MDE, a variação do ângulo de direção (*angle step size*) e a distância no horizonte a ser observada (*sample distance step*). A variação do ângulo de direção dá o passo do ângulo (em graus) entre direções azimutais sucessivas para o cálculo do horizonte para o(s) ponto(s) de referência. Por exemplo, um valor de 15º de passo, resultaria em 360/15=24 direções, e produziria 24 mapas raster. O outro parâmetro de distância controla o tamanho do passo de distância de amostragem para a busca do horizonte ao longo da linha de visão, o valor padrão para ele é 1.0, o que significa que o módulo irá considerar 1 vez a resolução espacial do mapa raster, por exemplo: se a resolução do mapa de entrada é de 30 m, a visada do horizonte será calculado de 30 em 30 metros. Se utilizarmos valores menores para esses dois últimos parâmetros, obteremos resultados mais precisos (HOFIERKA *et al.*, 2007b).

O processamento do sombreamento não necessariamente precisa ser feito à parte do módulo r.sun, pois este já possui a capacidade de fazê-lo de forma automática, porém, isso implicaria em muito mais tempo e recursos computacionais para a geração dos dados de radiação solar, que, a depender da escala da área a ser analisada e da resolução espacial do mapa de elevação, acrescentaria horas ou até dias de processamento.

4.6.4 Albedo

Segundo Ruhoof *et al.* (2015), um dos principais componentes do balanço de energia na Terra é o albedo de uma superfície, que pode ser definido como a razão não-dimensional entre a radiação refletida por uma superfície e a irradiância incidente sobre ela. Essa razão é altamente variável no tempo e no espaço devido a mudanças nas propriedades das superfícies, nas condições de iluminação, dos efeitos atmosféricos e das atividades humanas (desmatamentos, queimadas, ocupação do solo, plantações, etc.).

Destarte sua importância nos cálculos do balanço de energia para a agricultura e para o monitoramento de alterações no ambiente, estudos sobre o albedo na superfície também foram utilizados na avaliação do desempenho dos módulos de geração de energia FV (BRENNAN *et al.*, 2014).

Por influenciar no desempenho dos módulos FV e na quantidade de radiação presente na atmosfera, o albedo é um dos parâmetros necessários para os cálculos de

radiação solar e pode ser estimado de forma satisfatória utilizando-se a álgebra de mapas sobre dados de sensoriamento remoto para qualquer ponto do planeta. Diversos trabalhos científicos já comprovaram a eficácia do uso de produtos de sensoriamento remoto para determinação do albedo, inclusive na região semiárida brasileira (SANTOS *et al.*, 2017; FERREIRA JR.; DANTAS, 2018; SILVA *et al.*, 2019).

Um dos algoritmos que pode ser utilizado para a determinação de variáveis do balanço de energia é o Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (SAFER), ou Algoritmo Simples para Recuperação de Evapotranspiração, capaz de estimar a evapotranspiração da vegetação em larga escala a partir de dados de sensoriamento remoto. Este algoritmo foi aplicado e validado em áreas contendo culturas irrigadas e vegetação natural no semiárido brasileiro (TEIXEIRA *et al.*, 2013).

Esse algoritmo nos permite determinar o albedo da superfície por meio da aplicação sequencial de equações sobre os dados radiométricos das diversas imagens espectrais de satélites. Para valores de albedo da superfície diários, Silva *et al.* (2019) determinou coeficientes de regressão a partir de dados medidos em campo e a partir de satélites, sendo capaz de estimar o albedo instantâneo, ou seja, no momento da passagem do satélite, e o albedo para um período de 24 horas. Neste trabalho os autores realizaram um estudo de caso na região semiárida brasileira no desenvolvimento de uma ferramenta para a modelagem espacial do balanço de energia usando imagens de satélite e dados agrometeorológicos.

4.6.5 Coeficiente de turbidez de Linke

O Coeficiente de Turbidez de Linke (TL) é um fator de aproximação empregado para modelar a absorção atmosférica e a dispersão da radiação solar sob céu claro (sem nuvens). Esse parâmetro é determinado pela espessura óptica da atmosfera em decorrência da absorção do vapor de água e a absorção e dispersão das partículas de aerossois em relação à atmosfera limpa e seca. Ele resume a turbidez da atmosfera e, consequentemente, a atenuação da radiação solar direta, não possui unidade e seu valor varia de 1 (céu perfeitamente limpo e seco) a 7 (céu altamente poluído) (PROJECT SODA, 2003).

O conhecimento da variação anual da turbidez atmosférica local é uma informação extremamente importante nos estudos climatológicos, de poluição atmosférica, na estimativa de eficiência de coletores solares, em modelagem de fotossíntese em culturas, em florestas, etc (SOUZA *et al.*, 2011).

Porém, devido à natureza dinâmica da variabilidade desse coeficiente, não é possível ser modelado com um alto nível de precisão. Assim, pesquisadores como Pintor *et al.* (2015) e Huld (2017) utilizam informações da base de dados do Project SoDa (2003). Esse projeto executou o mapeamento global de inúmeras variáveis relacionadas ao recurso

solar, entre elas o TL. Em virtude da escala do projeto, optou-se por utilizar mapas de baixa resolução espacial, desconsiderando pequenas variações de elevação da superfície terrestre, uma vez que esse fator aumentaria a necessidade de processamento computacional nos cálculos das variáveis. Para melhorar a precisão desses dados, Huld (2017) propôs recalcular os valores médios mensais do TL com a seguinte equação:

$$T_{L,0m} = \frac{T_L}{e^{-z/8434,5}} \tag{4.1}$$

Onde z é a elevação acima do nível do mar (em metros) e T_L é o valor de Linke calculado na elevação. Considerando que, em menor escala, a elevação do terreno é um fator que influencia diretamente a espessura da atmosfera, esse método pode produzir resultados mais adequados para pesquisas com dados em alta resolução espacial.

4.6.6 Coeficiente de céu claro

O módulo r.sun, diferentemente do ArcGIS Solar Analyst, considera os efeitos da nebulosidade na atenuação da radiação solar que chega à superfície (GONÇALVES *et al.*, 2015). Por padrão, o r.sun considera a radiação solar num cenário de céu claro, sendo opcional ao pesquisador inserir na modelagem os dados sobre nebulosidade sob a forma de um Coeficiente de Céu Claro (Kc) no formato de um mapa raster ou aplicar esses dados com auxílio da álgebra de mapas.

Nguyen e Pearce (2010) listaram três possíveis métodos para de terminar o Kc: (a) utilizar dados existentes de radiação solar em condições de céu claro e de céu nublado (ou céu real), sendo o Kc a razão entre a primeira pela segunda, representada pela equação 4.2 (HOFIERKA; ŠÚRI, 2002); (b) aplicar regressão linear, e; (c) fazer a derivação indireta do Kc a partir do índice de cobertura de nuvens informado nas imagens de satélites (MARTINS *et al.*, 2005).

$$Kc = \frac{Radiacao_{ceu-claro}}{Radiacao_{ceu-real}} \tag{4.2}$$

O primeiro método é o que tem menor custo, menor demanda computacional e menor necessidade de aquisição de dados extras. Assim, seria possível calcular a radiação solar para o céu real para a área estudada mediante a álgebra de mapas aplicando a equação 4.3.

$$Radiacao_{ceu-real} = Kc \cdot Radiacao_{ceu-claro} \tag{4.3}$$

Também é possível calcular o Kc a partir dos dados de radiação solar medidos por sensores radiométricos na superfície da Terra empregando-os na mesma equação do

primeiro método supracitado. No entanto, Gonçalves *et al.* (2015) destacaram a necessidade de utilizar dados da radiação solar modelada exatamente nos mesmos pontos onde se localizam as estações de medição, e que o valor de Kc é diferente para as componentes solares direta e difusa.

Pintor *et al.* (2015) também utilizaram esse método, e para se assegurar da qualidade dos dados de radiação usados em sua pesquisa definiram um mínimo de oito sensores de radiação com um alto grau de confiabilidade em termos de completude das leituras, sendo que utilizaram os dados de seis estações só para o cálculo do Kc. Isso significa que a quantidade e qualidade das medições em terra da radiação solar é fundamental para a determinação do Kc, e a não conformidade na coleta desses dados impossibilitaria sua determinação.

A depender da escala da área de estudos, uma boa avaliação da energia solar deve levar em conta os efeitos das nuvens, mesmo sendo um fator bastante difícil de modelar, entretanto é necessário empregar um método confiável e que se aproxime ao máximo das reais condições locais.

Parte III

Metodologia

5 Metodologia

Apesar de as Ciências Computacionais integrarem o ramo das Ciências Exatas, estão em uma área do saber que permeia todos os outros ramos do conhecimento. Mais identificável com atividades meio, a computação é por natureza interdisciplinar e multidisciplinar em sua construção e transdisciplinar em sua aplicação.

Para melhor compreensão da metodologia, retomamos o objetivo da tese, que buscou aplicar uma abordagem baseada em SIG para avaliar o potencial de geração de energia solar por meio de módulos FV na região do semiárido sergipano. Destarte, buscou-se determinar os parâmetros necessários para estimar a radiação solar com auxílio de um SIG, automatizar a modelagem da radiação solar com auxílio computacional, calcular e analisar o potencial FV das áreas não urbanizadas para o modelo centralizado de geração FV, e, por fim, avaliar os impactos da entrada dessa nova fonte de energia naquela região.

5.1 Classificação e caracterização da pesquisa

A aplicação do método científico é a maneira de se garantir um grau de confiabilidade aos resultados obtidos em uma pesquisa científica, definindo as diretrizes e orientações de como proceder o trabalho de pesquisa, quais técnicas devem ser utilizadas, a sequência de atividades a serem seguidas, etc. Assim, para conferir qualidade e confiabilidade ao trabalho científico, é importante que classifiquemos a pesquisa quanto a sua abordagem do problema, sua natureza, seus objetivos e os procedimentos técnicos a serem empregados.

Diante do exposto, esta pesquisa foi metodologicamente caracterizada quanto a seus objetivos e sua natureza como: exploratória, descritiva e aplicada. E buscamos a abordagem quantitativa, uma vez que seu objetivo foi estimar o potencial de geração de energia solar na região do semiárido sergipano. Quanto aos procedimentos, empregamos principalmente as pesquisas bibliográfica e documental, em especial de fontes de dados cartográficos.

Quanto aos objetivos, a pesquisa caracteriza-se como exploratória pela necessidade de delimitarmos corretamente o tema da pesquisa, nos familiarizarmos melhor com os assuntos abordados e buscarmos descobrir um novo enfoque social para o assunto. E sua característica descritiva surge pelo objetivo de descrevermos os possíveis impactos da entrada de uma nova fonte de energia na região estudada.

Quanto à natureza a pesquisa é do tipo aplicada, pois se preocupa com a aplicabilidade dos resultados e ilações práticas pelo conhecimento gerado. O conhecimento e

aproveitamento das potencialidades da energia solar no semiárido sergipano se traduz em uma solução de ordem prática e o desejo de conhecer para agir.

Numa pesquisa interdisciplinar é relevante empregar diferentes técnicas de pesquisa a fim de ampliar as fontes de dados e, a partir de estratégias de triangulação, evitar a limitação das fontes de investigação. Marconi e Lakatos (2010, p.157) conceituam essas técnicas como "um conjunto de preceitos ou processos de que serve uma ciência ou arte". Diversos procedimentos técnicos podem ser adotados para a condução de uma pesquisa, e pode classificá-la como: bibliográfica, documental, de levantamento, experimental, estudo de caso, etc.

Nossa pesquisa bibliográfica objetivou adquirir informações à respeito dos conceitos, definições e variáveis acerca da radiação solar, quantidade de energia, formas de aproveitamento elétrico solar, sistemas e modelos de geração FV e maturidade da tecnologia. Também buscamos nos familiarizar com o tema da energia no Brasil, nossa matriz energética, o potencial solar nacional e os benefícios da energia solar para o país. Quanto à estimativa do potencial FV, estudamos informações à respeito das formas de estimar o potencial solar, as escalas de medida, parâmetros necessários, além de conhecermos sobre os meios de estimativa mediante tecnologias de sensoriamento remoto, ferramentas de geoprocessamento para energia solar e pesquisas sobre emprego de SIG para estimativas e planejamento energético solar. Para tanto, usamos como fontes livros e, principalmente, artigos científicos mais recentes possíveis, uma vez que a tecnologia solar e os SIG se aprimoram e evoluem muito rapidamente.

Além dos conhecimentos de ordem técnica e científica relacionados à energia em si, buscamos entender qual a importância desse recurso para os habitantes da área estudada além na questão ambiental.

A pesquisa documental objetivou a coleta de dados e informações sobre medidas de radiação solar no Brasil, relatórios sobre a matriz energética e situação das fontes de energia no país, potencial solar nacional, dados de desenvolvimento socioeconômico ligado à adoção da energia solar, relatórios técnicos de componentes FV, produtos de sensoriamento remoto (imagens de satélites e mapas temáticos), políticas públicas e legislação brasileira e internacional sobre eficiência energética e mudanças climáticas, manuais técnicos dos sistemas de geoprocessamento QGIS e GRASS.

As fontes de onde obtivemos os dados e informações sobre a matriz energética e o sistema elétrico brasileiro foram, principalmente, relatórios da ANEEL, EPE, INPE e Inmetro; e os produtos de sensoriamento remoto foram aqueles disponibilizados pelo INPE, INDE, ABES (PEREIRA *et al.*, 2017), Projeto MapBiomas (PROJETO MAPBIOMAS, 2020), Observatório de Sergipe, Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe (SEMARH, 2017), USGS, NASA, NOAA, Atlas Solar Global (SOLARGIS, 2019).

Para facilitar a visualização dos procedimentos da pesquisa e balizar nossas atividades, elaboramos os quadros 3 e 4, elencando os conceitos e definições que buscamos para adquirirmos os conhecimentos necessários e as fontes documentais.

Quadro 3: Pesquisa Bibliográfica

Temas	Conceitos e definições
Radiação solar	Variáveis da radiação solar; aproveitamento elétrico solar; sistemas e modelos de geração FV; maturidade da tecnologia FV
Energia no Brasil	Matriz energética brasileira; potencial solar nacional, no semiárido e em Sergipe; benefícios da energia solar
Energia e sociedade	Energia como direito social; mínimo existencial; energia solar e desenvolvimento social
Estimativa de potencial solar	Formas de estimativa do potencial solar; meios de estimativa por sensoriamento remoto; pesquisas com SIG para energia solar; análise e comparativo das ferramentas SIG para análise solar

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4: Pesquisa Documental

Temas	Fontes
Medidas de radiação solar	INPE, NOAA, NASA, ABES, Atlas Solar Global
Matriz energética, fontes de energia e potencial solar	EPE, INPE, ANEEL, ABES
Produtos de sensoriamento remoto	INPE, INDE, NOAA, NASA, USGS, Projeto MapBiomas, Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe, Observatório de Sergipe, ABES, Atlas Solar Global
Políticas públicas e legislação	Congresso Brasileiro, Presidência da República do Brasil, ANEEL, Ministério de Minas e Energia, ONU
Ferramentas de análise solar	Manuais do GRASS e QGIS

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressaltamos que as fontes retromencionadas foram as principais utilizadas na pesquisa, mas não nos limitamos a estas.

5.2 Caracterização e delimitação da área de estudos

Uma unanimidade nos trabalhos publicados sobre avaliação do potencial solar com SIG foi a grande demanda computacional para o processamento das imagens, o que implicava no tempo que as máquinas levavam para gerar as projeções e cálculos do potencial solar sobre as áreas. Por isso, a recomendação é delimitar as escalas espaciais

e temporais de acordo com a precisão e resolução espacial dos resultados que se deseja obter.

Quanto à escala temporal, pesquisadores recomendam que seja de ao menos um ano, de forma que o potencial solar seja analisado em todos os meses, em decorrência da sazonalidade climática e do posicionamento da Terra em relação ao Sol (TIBA *et al.*, 2014; PEREIRA *et al.*, 2017; HULD, 2017). Quanto à escala espacial, depende do objetivo do pesquisador, do limite de tempo da pesquisa e dos recursos tecnológicos disponíveis, sendo que esta escala pode variar de um único edifício até um país inteiro.

Os fatores climáticos são determinantes para as estimativas de geração de energia FV, e estudos já apontaram para o potencial do semiárido brasileiro (TIBA *et al.*, 2014; PEREIRA *et al.*, 2017). Em diversas regiões do Brasil, como na Nordeste, as duas únicas estações sazonais bem definidas são a seca e a chuvosa. No semiárido essas estações ocorrem em diferentes épocas do ano a depender da região, em virtude da geografia e efeitos da continentalidade. Em Sergipe o período chuvoso ocorre entre os meses de março e agosto, e o período seco de setembro a fevereiro (MOURA *et al.*, 2007).

Assim, considerando que os objetivos da pesquisa envolvem a avaliação do potencial solar em uma área de alta incidência de radiação e dos impactos socioeconômicos da entrada de uma fonte alternativa de energia elétrica em uma determinada região, definimos como nossa área de estudos todo o semiárido sergipano conforme delimitação estabelecida pela SUDENE (2017).

O estado de Sergipe está inserido na região Nordeste do Brasil, limitando-se ao Norte com o Estado de Alagoas tendo o rio São Francisco como divisor, ao Sul e Oeste com o Estado da Bahia, e a Leste com o Oceano Atlântico. É o menor estado brasileiro com uma extensão territorial de 21.962,10 km^2, o equivalente a 0,26% do território nacional e a 1,4% em relação à região Nordeste. A região semiárida sergipana possui uma área de 11.068,38 km^2, o que compreende aproximadamente 50% de todo o estado de Sergipe (figura 10) (SUDENE, 2017).

Resultados do ABES (PEREIRA *et al.*, 2017), mostraram que Sergipe apresenta uma média anual de radiação solar global entre 5,1 e 5,5 kWh/m^2, o que equivale aos valores máximos dessa mesma componente solar em todo o continente europeu.

Figura 10: Mapa da área de estudos

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Procedimentos metodológicos

5.3.1 Determinação dos parâmetros para modelagem

Para realizarmos os cálculos de estimativa de radiação solar, foram necessárias a aquisição, organização e preparação de alguns parâmetros iniciais necessários como variáveis de entrada dos módulos do SIG. Os dados obtidos de fontes externas se referem às imagens de satélite, ao MDE e valores de TL. Os mapas raster de declividade, orientação e horizonte foram gerados por funcionalidades do próprio SIG a partir do MDE. Já os dados raster de albedo e TL foram produzidos mediante procedimentos específicos baseados em outros estudos científicos.

O SIG GRASS versão 7.4 foi usado como plataforma para organizar, manipular,

processar, analisar e visualizar os dados de satélites e mapas digitais. Todos os produtos cartográficos, quando necessário, foram convertidos para a projeção geográfica SIRGAS 2000, que é o datum padrão a ser utilizado no Brasil (IBGE, 2005).

Optamos pelo uso do GRASS em virtude de ser uma aplicação de código aberto e que vem sendo aperfeiçoada e utilizada com sucesso há anos por diversas organizações de pesquisa públicas e privadas, além de possuir uma ferramenta de análise solar com resultados bastante satisfatórios como já relatado em diversos trabalhos científicos citados nesta pesquisa.

5.3.1.1 Imagens de satélites

As imagens satelitais utilizadas para os cálculos de albedo foram obtidas no serviço online EarthExplorer da USGS, disponibilizadas com resolução espacial de 30 m e datum WGS84 24N. Para nosso trabalho utilizamos os arquivos de metadados e as imagens das bandas espectrais 1 a 7 do sensor OLI do satélite LANDSAT 8, correspondentes à órbita 215, pontos 067 e 068, referentes à área de cobertura do estado de Sergipe (NASA, 2019b).

Empregamos as imagens mais recentes disponíveis e com a menor cobertura de nuvens possível, de maneira que retratassem os períodos seco e chuvoso na região. Essa necessidade se dá pelo fato de a cobertura vegetal e a umidade do solo sofrerem considerável variação entre os dois períodos climáticos da região, o que vem a afetar diretamente os valores do albedo da superfície.

As imagens dos satélites LANDSAT são disponibilizadas em arquivos distintos para cada banda espectral em forma de mosaicos do terreno, e nem sempre é possível obter imagens totalmente livre de nuvens, portanto, foi necessária a aplicação de ferramentas SIG para mesclagem, recorte e mascaramento de nuvens nessas imagens.

5.3.1.2 MDE

Para todos os cálculos que necessitaram de dados de elevação do terreno, usamos o MDE com resolução espacial de 30 m fornecido pelo Projeto Topodata e produzidos a partir do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que teve como propósito coletar dados digitais para a geração de um MDE de todas as terras continentais do planeta INPE (2020).

Optamos por utilizar esse MDE em virtude de o Projeto Topodata ter por objetivo sempre manter os dados mais atualizados possíveis, e disponibilizá-los a partir de um pré-processamento executado com uma metodologia especializada, aplicada por profissionais com expertise nesta área. Isso também resultou em dados de radiação solar mais precisos que os elaborados pelo ABES, que possui resolução de 10.000 m (PEREIRA *et al.*, 2017),

e o Atlas Solar Global que possui resolução espacial de 250 m (SOLARGIS, 2019).

5.3.1.3 Orientação e declividade do terreno

Além do MDE, outros dois mapas exigidos para cálculo da radiação solar pelo módulo r.sun são os de orientação e declividade do terreno, que geramos com o módulo r.slope.aspect do GRASS. O primeiro mapa apresenta a direção azimutal de cada pixel da imagem em relação ao Leste (0º) e o segundo, qual o grau de inclinação (em graus decimais).

Também geramos um mapa de declividade com os valores representados em porcentagem para utilizar na análise de adequabilidade de locais ideais para instalação de centrais FV.

5.3.1.4 Horizonte

Os mapas de horizonte foram gerados com o módulo GRASS r.horizon para agilizar o processamento dos mapas de radiação, reduzindo o tempo e a exigência de recursos computacionais, conforme orientação contida no manual do GRASS r.sun (HOFIERKA *et al.*, 2007a).

Definimos como parâmetros: a variação do ângulo de direção (*angle step size*) igual a 15º e a distância de amostragem no horizonte (*sample distance step*) de 0,5. Assim, obtivemos 24 mapas de horizonte.

5.3.1.5 Albedo

No cálculo do albedo aplicamos as fórmulas apresentadas a seguir de acordo com os processos definidos por Allen *et al.* (2002) para o SEBAL e por Silva *et al.* (2019) para o algoritmo SAFER, sobre imagens LANDSAT 8, utilizando a álgebra de mapas do GRASS 7.4, a fim de gerar mapas de albedo.

Reflectância no topo da atmosfera (ρ'_λ)

Primeiro calculamos a reflectância no topo da atmosfera (TOA) para as bandas espectrais 1 a 7 aplicando a equação 5.1 sugerida no Manual do LANDSAT 8 (NASA, 2019a).

$$\rho'_\lambda = M_\rho \cdot Q_{cal} + A_\rho \tag{5.1}$$

Os valores obtidos estão sem correção para o ângulo de elevação solar, onde Q_{cal} corresponde ao número digital de cada pixel, M_ρ corresponde ao fator de escala multiplicativo da reflectância para a banda e A_ρ corresponde ao fator de escala aditivo

da reflectância para a banda, os valores dos fatores multiplicativos e aditivos podem ser encontradas no arquivo de metadados da imagem.

Reflectância corrigida no TOA (ρ_λ)

Para corrigirmos os valores da reflectância para cada banda espectral em função do ângulo da elevação solar e da distância Terra-Sol, aplicamos a equação 5.2 usada por Ruhoof *et al.* (2015) para as bandas 1 a 7:

$$\rho_\lambda = \frac{\rho'_\lambda}{\cos(\Theta_{SZ}) \cdot \frac{1}{d^2}} = \frac{\rho'_\lambda}{\sin(\Theta_{SE}) \cdot \frac{1}{d^2}} \tag{5.2}$$

Onde, Θ_{SE} corresponde ao ângulo de elevação do Sol no local em graus decimais, registrado no arquivo de metadados da imagem, Θ_{SZ} corresponde ao ângulo do zênite solar, que pode ser calculado por $\Theta_{SZ} = 90^o - \Theta_{SE}$, e d representa a distância astronômica Terra-Sol, que também pode ser obtida no arquivo de metadados.

Albedo TOA

Com os valores da reflectância corrigida, calculamos o albedo no TOA (α_{toa}) pela equação 5.3 proposta por Silva *et al.* (2019), com os pesos calculados a partir da Lei de Plank:

$$\alpha_{toa} = 0,010 \cdot \rho_1 + 0,31 \cdot \rho_2 + 0,30 \cdot \rho_3 + 0,13 \cdot \rho_4 + 0,08 \cdot \rho_5 + 0,05 \cdot \rho_6 + 0,04 \cdot \rho_7 \tag{5.3}$$

Onde ρ_1, ρ_2, ρ_3, ρ_4, ρ_5, ρ_6, ρ_7 correspondem à reflectância corrigida no TOA para as bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente.

Albedo da superfície

Agora, é possível calcular os valores do albedo da superfície por meio das equações 5.4 e 5.5, também propostas por Silva *et al.* (2019), com coeficientes de regressão calculados a partir de dados medidos por estações em terra:

$$\alpha_0 = 0,6054 \cdot \alpha_{toa} + 0,0797 \tag{5.4}$$

$$\alpha_{24h} = 1,0223 \cdot \alpha_0 + 0,0149 \tag{5.5}$$

Onde α_0 corresponde ao albedo da superfície instantâneo, ou seja, aquele medido no momento da passagem do satélite, e α_{24h} corresponde ao albedo da superfície durante as 24 horas do dia.

Após esses processos foi possível gerar os dois mapas raster com os valores do albedo da superfície nas 24h para os períodos seco e chuvoso, as únicas estações bem definidas na região, e que serão utilizados na pesquisa para o cálculo da radiação solar.

5.3.1.6 Turbidez de Linke

Para produção dos mapas mensais do TL, utilizamos as médias mensais dos resultados obtidos pelo Projeto SoDa, que analisou o TL de todo o globo combinando os valores extraídos de dados de radiação e de dados fornecidos por satélites da NASA (PROJECT SODA, 2003).

Primeiramente definimos 03 pontos 60 km equidistantes entre si na região do semiárido sergipano, empregando a ferramenta Pontos Regulares do QGIS (Tabela 1):

Tabela 1: Pontos de coleta do TL

Ponto	Latitude	Longitude
P1	-37.697	-10.056
P2	-37.151	-10.057
P3	-37.695	-10.604

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores obtidos para cada mês em cada ponto mostraram-se muito semelhantes devido à pequena extensão territorial e baixa variabilidade dessa grandeza atmosférica, como podemos observar na tabela 2. Assim resolvemos utilizar a média mensal considerando os valores dos 03 pontos de coleta.

Tabela 2: Dados de TL do Projeto SoDa

Mês	Ponto 01	Ponto 02	Ponto 03	Média
Janeiro	3,3	3,3	3,4	3,33
Fevereiro	3,2	3,3	3,3	3,27
Março	2,8	2,8	2,8	2,80
Abril	2,7	2,8	2,9	2,80
Maio	2,5	2,5	2,6	2,53
Junho	2,4	2,4	2,5	2,43
Julho	2,3	2,4	2,4	2,37
Agosto	2,2	2,2	2,2	2,20
Setembro	2,8	2,8	2,8	2,80
Outubro	2,8	2,8	2,8	2,80
Novembro	3,3	3,3	3,3	3,30
Dezembro	3,1	3,1	3,1	3,10

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Project SoDa (2003).

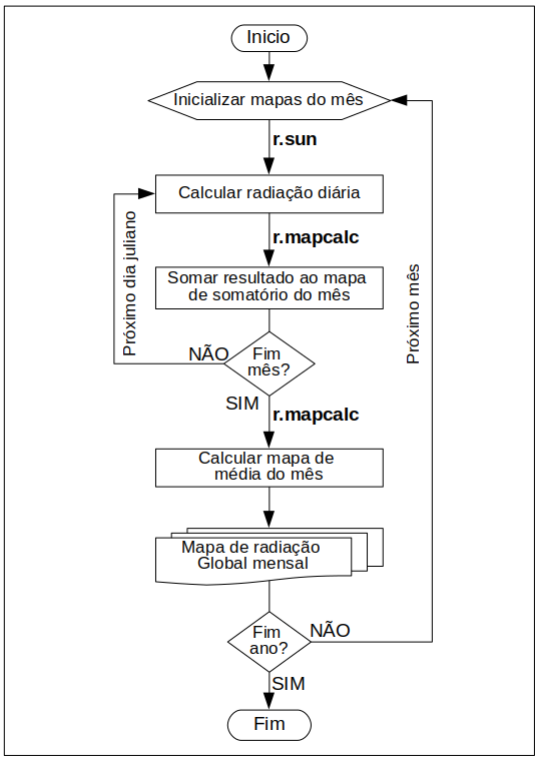
A partir desses valores médios, geramos mapas raster para o TL com a calculadora raster do GRASS, aplicando a equação 4.1 proposta por Huld (2017), considerando os dados de elevação do terreno encontrados no MDE utilizado nesta pesquisa.

5.3.2 Codificação do algoritmo de automatização

Um algoritmo é um conjunto de regras e procedimentos lógicos para a solução de um problema com um número finito de etapas. Como o r.sun processa somente um dia do ano por vez, desenvolvemos um algoritmo na linguagem de programação Python, compatível com o GRASS, para automatizar a geração dos mapas mensais.

Para nos orientarmos no desenvolvimento do algoritmo, elaboramos o fluxograma ilustrado na figura 11.

Figura 11: Fluxograma do algoritmo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

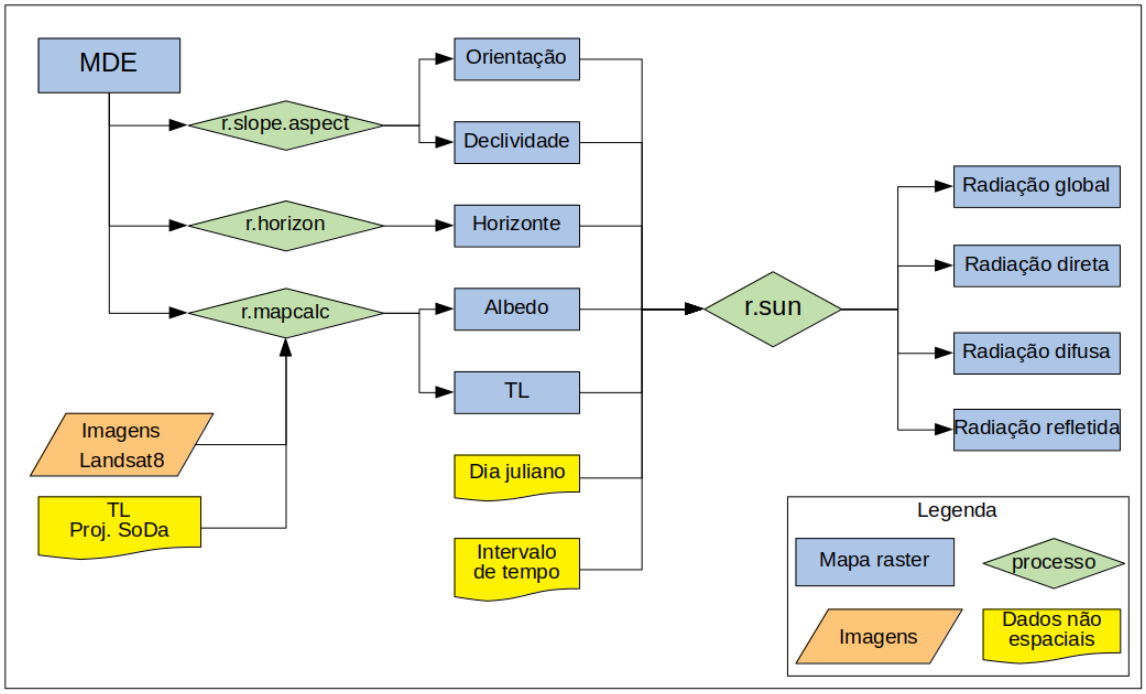
Os produtos resultantes do algoritmo são mapas raster contendo dados de radiação solar média e acumulada diária, agrupados em 12 mapas mensais e um anual para cada componente solar - direta, difusa e global - no formato digital GeoTIFF, compatíveis com a maioria dos SIG utilizados comercial e academicamente, e a unidade de medida é $kWh/m^2/dia$.

5.3.3 Modelagem da radiação solar

Nessa etapa da pesquisa modelamos a radiação solar da área estudada utilizando o módulo de análise solar r.sun do GRASS no algoritmo que desenvolvemos fornecendo como entrada os mapas e dados anteriormente especificados na pesquisa. Parametrizamos o algoritmo para executar a modelagem solar diária em intervalos de 30 minutos, o que representa uma variação de 7,5º no ângulo de incidência dos raios solares no terreno.

Para melhor visualização dos processos estabelecidos, elaboramos o diagrama abaixo (figura 12).

Figura 12: Diagrama de processos para modelagem.



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.3.1 Radiação para o céu real

Como mencionado anteriormente, o módulo r.sun do GRASS é a implementação de um modelo de radiação solar para o céu claro, sem nuvens, e é necessário calcular um índice de nebulosidade, o Kc, para obtermos a radiação para o céu real.

Uma das maneiras mais confiáveis de se calcular o Kc seria utilizar dados de sensores radiométricos em terra. Na área de estudos somente existem quatro desses sensores, mas, devido à inúmeras falhas de coleta, seus dados se mostraram inviáveis tanto para o cálculo do Kc quanto para validação dos dados de radiação solar. Assim, para calcularmos o Kc, utilizamos o método empregado por Hofierka e Šúri (2002) que sugeriram aproveitar dados de outras fontes científicas.

Como o Atlas Solar Global (SOLARGIS, 2019) fornece dados de radiação global para o céu real, obtivemos no site do projeto o mapa raster de irradiaçao global horizontal contendo a média diária de radiação anual estimada a partir de dados meteorológicos históricos do período de 1999 a 2018, coletados por sensoriamento remoto e estações em terra.

Após reprojetarmos o datum do mapa obtido para o SIRGAS 2000 24S, usamos a álgebra de mapas para submetermos tais dados na equação 4.2 como sendo a radiação medida. Desta forma obtivemos como resultado um mapa raster com os valores do Kc

variando entre 0,67 e 0,97, com uma média de 0,72.

Novamente com a álgebra de mapas aplicamos os dados raster do Kc no cálculo da radiação global para o céu real, empregando para isso a equação 4.3 em cada mapa mensal modelado e no mapa anual.

Esses mapas de radiação global para o céu real são as fontes de dados principais para as próximas etapas da pesquisa que compreenderam o mapeamento dos locais mais adequados para instalações de centrais FV e a estimativa do potencial técnico para geração elétrica FV. Os mapas das demais componentes solares farão parte de uma base de dados e poderão servir de subsídio para usos futuros.

5.3.3.2 Validação da modelagem

Para validar os resultados da modelagem, comparamos os dados modelados da radiação global média mensal e anual para o céu real com os dados do ABES (PEREIRA *et al.*, 2017), utilizando as métricas para avaliar a precisão da estimativa de energia solar definidas por Zhang *et al.* (2013) e utilizadas por Pintor *et al.* (2015). Para esse processo, as seguintes equações estatísticas foram aplicadas:

Erro de Tendência Média (ETM)

$$ETM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(modelada - mensurada) \tag{5.6}$$

Onde n corresponde ao número de meses modelados. A métrica ETM visa indicar a tendência ou viés médio da modelagem, que nada mais é que uma estimativa. Compreender a tendência geral da modelagem (super ou subestimação) permitiria aos operadores de um sistema de energia alocar melhor os recursos para compensar os erros de previsão.

Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM)

$$EQMR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(modelada - mensurada)^2}{n}} \tag{5.7}$$

A REQM é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos, com a vantagem que apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada, e também fornece uma medida de erro global durante todo o período da modelagem.

Erro Absoluto Médio (EAM)

$$EAM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|modelada - mensurada| \tag{5.8}$$

O EAM tem sido amplamente utilizado em problemas de regressão e pela indústria de energia renovável para avaliar o desempenho de modelagens. Essa métrica também

é uma medida de erro global, que, ao contrário da métrica REQM, não considera excessivamente eventos de modelagem extremos.

Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM)

$$EPAM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{100 \cdot |modelada - mensurada|}{mensurada} \tag{5.9}$$

O EPAM é calculado como a média do erro percentual. Muitas organizações focam principalmente nessa métrica ao avaliar a precisão das previsões. Porém, o pesquisador tem que ter em mente que a sensibilidade da escala utilizada pode tornar essa métrica ineficiente como uma medida de erro para baixo volume de dados.

A seguir analisaremos a área estudada para determinarmos os locais mais adequados para a instalação de centrais elétricas FV a partir da avaliação de múltiplos critérios.

5.3.4 Análise de locais para centrais FV

Para analisar os locais mais adequados para a instalação de centrais FV no semiárido sergipano, dividimos os procedimentos em duas etapas, a primeira focada na aplicação de um método pelo qual pudéssemos obter as áreas disponíveis para a localização de centrais FV. Posteriormente, as áreas disponíveis foram avaliadas a partir de múltiplos critérios, utilizando o método AHP para determinar a importância dos diferentes critérios delimitados e a Análise de Sobreposição Ponderada. Essa metodologia já foi empregada com sucesso em outros trabalhos científicos semelhantes, inclusive no Brasil (NGUYEN; PEARCE, 2010; SÁNCHEZ-LOZANO *et al.*, 2013; TIBA *et al.*, 2014; PINTOR *et al.*, 2015; AZEVÊDO *et al.*, 2017).

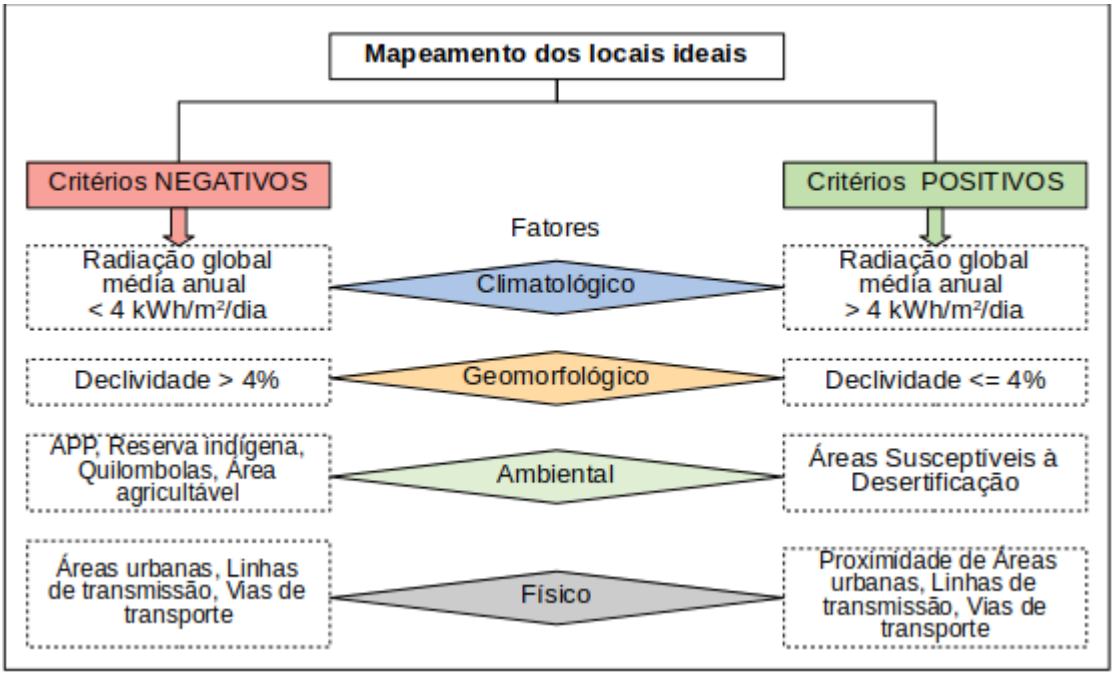
Segundo a literatura científica, algumas áreas possuem restrições geográficas de uso, as quais chamaremos de "Critérios Negativos", como: APP, terras agricultáveis, reservas indígenas e quilombolas, infraestruturas e áreas de expansão urbana, e terrenos muito inclinados. Também é necessário considerar a importância de terrenos com pouca declividade, da proximidade de boas vias de acesso para transporte dos equipamentos de grande porte ou delicados, de linhas de transmissão de energia e das áreas urbanas, as quais chamaremos de "Critérios Positivos".

Somando-se a essas características, diversas regiões do Brasil, em especial a Nordeste, sofrem com processos de desertificação, resultantes da degradação ambiental e socioambiental, particularmente em zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, consequência, entre outros fatores, das variações climáticas e das atividades antrópicas inadequadas (TOMASELLA *et al.*, 2018). As Áreas Susceptíveis à Desertificação (ASD) restringem as possibilidades de uso da terra para atividades agrossilvipastoris, o que as tornam propícias para a instalação de módulos solares.

A radiação solar também é um critério determinante para escolha do local onde se instala uma central FV. Regiões com altos índices de radiação solar são mais favoráveis. Segundo Pintor *et al.* (2015), locais com radiação global média anual abaixo de 4,0 kWh/m^2/dia torna o empreendimento menos atrativo aos investidores.

Classificamos esses critérios em quatro fatores: ambiental, climático, físico e geomorfológico (figura 13).

Figura 13: Critérios para mapeamento dos locais ideais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para atingirmos nosso objetivo, obtivemos mapas temáticos digitais a partir, principalmente, dos produtos cartográficos disponibilizados pelo Projeto MapBiomas, que possui uma base de dados constantemente atualizada do mapeamento do uso e cobertura do solo brasileiro e outros temas (PROJETO MAPBIOMAS, 2020). Ressaltamos que todos os mapas utilizados devem estar no formato raster e com a mesma resolução espacial.

Ao final dessas etapas, o cruzamento de dados dos critérios positivos e negativos resulta num mapa dos locais ideais para instalação de centrais FV no semiárido sergipano.

5.3.4.1 Mapeamento das áreas disponíveis

O objetivo principal nessa fase foi eliminar as áreas que possuem alguma restrição física, legal ou desfavorável para a instalação de uma central FV. Foi definindo para cada pixel do mapa sua disponibilidade ou indisponibilidade, atribuindo-lhes valores 1 ou 0, respectivamente. Para cada critério negativo, os mapas foram manipulados e reclassificados de acordo com dados de trabalhos científicos e da legislação brasileira, resultando em um novo mapa raster.

Seguindo a literatura científica, relacionamos os critérios negativos, suas restrições (e as fontes que as justificam), os mapas temáticos utilizados e as fontes dos mapas:

a) Declividade: Excluir áreas com mais de 4% de inclinação (NGUYEN; PEARCE, 2010; TIBA *et al.*, 2014; AZEVÊDO *et al.*, 2017). Mapas: declividade em porcentagem, elaborado pelo autor a partir de INPE (2020);

b) APP: Definir buffer (área além de seus limites) de acordo com a legislação (BRASIL, 2012). Mapas: uso e cobertura (categoria: áreas com caatinga preservada), rios e unidades de conservação, obtidos a partir de SEMARH (2017) e Projeto MapBiomas (2020);

c) Reservas indígenas e quilombolas: Excluir áreas demarcadas ou em processo de demarcação (BRASIL, 1988). Mapas: terras indígenas, terras quilombolas, obtidos em SEMARH (2017);

d) Áreas agricultáveis: Excluir áreas destinadas à produção agrícola ou silviculturas (TIBA *et al.*, 2014; AZEVÊDO *et al.*, 2017). Mapas: uso e cobertura da terra (categorias: plantações agrícolas, silvicultura), assentamentos rurais, obtidos em SEMARH (2017) e Projeto MapBiomas (2020);

e) Áreas de expansão urbana: Excluir áreas urbanas e de expansão urbana (TIBA *et al.*, 2014; AZEVÊDO *et al.*, 2017). Mapas: uso e cobertura (categoria: áreas urbanas), obtido de Projeto MapBiomas (2020);

f) Linhas de Transmissão: Excluir áreas na faixa de segurança (ABNT, 1985). Mapas: linhas de transmissão, obtidos de Projeto MapBiomas (2020);

g) Vias de transporte: Excluir áreas na faixa de domínio (DNIT, 2010; BRASIL, 2013). Mapas: rodovias estaduais, rodovias federais e ferrovias, obtidos em SEMARH (2017) e Projeto MapBiomas (2020).

É importante justificarmos que definimos também como critério negativo as áreas com vegetação de caatinga preservada, considerando que a possível eliminação dessa vegetação não coaduna com os objetivos de preservação ambiental a que se objetiva o uso das energias renováveis, além do que, como ressalta Pintor *et al.* (2015), o manejo dessas áreas provocaria aumento nos custos de instalação.

A eliminação de declives maiores que 4% se justifica, segundo Sánchez-Lozano *et al.* (2013) e Pintor *et al.* (2015), pela redução dos custos de instalação com a adequação do terreno, da mesma forma que aŕeas com declives menores aumentam o potencial da área, convertendo-se num critério positivo.

5.3.4.2 Avaliação da adequabilidade da área

Nesta segunda fase aplicamos o método AHP, onde consideramos critérios que aumentam ou diminuem a adequabilidade de uma área. Esses critérios positivos definem o grau de adequabilidade de cada pixel disponível determinado na fase anterior.

Antes de aplicarmos o AHP, reclassificamos os critérios positivos em 5 classes cada, exceto declividade e ASD. Para obtermos as classes de proximidade dos critérios físicos aplicamos a ferramenta de Análise de Proximidade Raster do QGIS, que analisa as distâncias entre os pixels, também conhecidas como distâncias euclidianas, onde cada pixel do raster gerado representa a distância do pixel mais próximo no raster de entrada. Esse raster resultante é usado para determinar a adequabilidade dos pixels que estão a uma certa distância dos pixels da camada de entrada (OSGEO, 2019).

A hierarquia dos critérios positivos foi estabelecida a partir dos trabalhos de Sánchez-Lozano *et al.* (2013), Pintor *et al.* (2015) e Azevêdo *et al.* (2017). E utilizaremos a ferramenta AHP implementada por Goepel (2018) para obtermos uma tabela hierárquica de decisões com o peso que cada subcritério tem na adequabilidade das áreas para instalação de módulos FV.

Com esses dados geramos novos mapas raster para cada critério positivo onde atribuímos aos pixels os pesos determinados pelo método AHP. Sobre esses mapas, aplicaremos a Análise de Sobreposição Ponderada dos múltiplos critérios, agregando o peso de cada um, e produzindo o mapa de adequabilidade da área para centrais FV. Os pixels do mapa resultante possuem valores entre 0 e 1, onde 0 representa nenhuma adequabilidade e 1 muito alta adequabilidade.

5.3.5 Potencial solar para usinas FV

Nosso objetivo com esse procedimento é estimar a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada por módulos FV no semiárido sergipano. Para tanto, utilizamos os métodos aplicados por Sun *et al.* (2013) e Wong *et al.* (2016) para obter o potencial geográfico e o potencial técnico.

O potencial geográfico é a quantidade total de energia solar que atinge a superfície terrestre em uma determinada área e período de tempo. E o potencial técnico corresponde à quanto dessa energia os módulos e sistemas FV conseguem converter em energia elétrica (SUN *et al.*, 2013).

Ressaltamos que, para essa etapa da pesquisa, utilizamos os dados de radiação global acumulada para o céu claro, pois considerar as condições de nebulosidade acrescentaria uma variável bastante imprevisível, visto que, a título de ilustração, uma coleta dos dados de cobertura de nuvens das imagens do satélite LANDSAT 8 no ano de 2019 apresentaram valores que variaram entre 6,25% e 72,78% (NASA, 2019b).

Além disso, existem variações climáticas globais com sazonalidade plurianual, influenciadas principalmente pelos efeitos do El Niño e da La Niña, que afetam diretamente a temperatura e umidade atmosférica e, consequentemente, a formação de nuvens no Nordeste Brasileiro (MOURA *et al.*, 2007).

É necessário também entendermos que a potência que um módulo FV fornece pode variar conforme as condições de radiação solar e temperatura as quais está submetido, sendo que a potência fornecida pelo módulo ao meio-dia, com sol pleno, será maior que a potência fornecida pelo mesmo módulo no início da manhã ou no final de tarde. Destarte, não podemos supor que um módulo fotovoltaico irá fornecer a sua potência máxima durante todo o período claro do dia, e que os valores obtidos com os procedimentos aqui descritos estarão superestimados em comparação a uma medição real em campo.

5.3.5.1 Potencial geográfico

Lembrando que os mapas do tipo raster são formados por pixels (i), o potencial geográfico para esses locais é calculado de acordo com a equação 5.10 aplicada por Sun *et al.* (2013):

$$Pg_i = R_i \cdot A_i \tag{5.10}$$

Onde Pg_i é o potencial geográfico do pixel i; R_i representa a radiação global acumulada por m^2 em um ano no pixel i; e, A_i é a área do pixel, correspondente à resolução espacial do MDE, que no nosso caso é de 900 m^2. A unidade de medida é em kWh.

Se a taxa de conversão dos módulos FV fosse perfeita (100%), ou seja, cada 1 kWh de radiação solar fosse convertido em 1 kWh de energia elétrica, e a totalidade de cada pixel fosse coberta por esses módulos, a quantidade de eletricidade gerada seria calculada com o uso desta fórmula, porém isso está longe da capacidade real das tecnologias atuais e dos critérios técnicos de instalação (WONG *et al.*, 2016; INMETRO, 2017).

5.3.5.2 Potencial técnico

Devido às características físicas dos componentes dos sistemas de geração e transmissão, é necessário considerar perdas no processo de transformação da energia solar em elétrica. Os dois principais fatores de perdas são: a eficiência dos módulos FV e a eficiência do sistema FV (SUN *et al.*, 2013; WONG *et al.*, 2016).

Segundo a última avaliação de eficiência energética de módulos FV publicada pelo INMETRO (2017) e atualizada em 2018, entre 273 modelos analisados, o coeficiente de eficiência dos módulos constituídos por células de silício mono ou policristalinos, obteve uma média de 16%. Esse parâmetro está relacionado à capacidade de o módulo converter a

luz solar em eletricidade num processo chamado fotoconversão (FERREIRA *et al.*, 2018). Assim nos referiremos a este parâmetro como coeficiente de fotoconversão.

E a eficiência de um sistema FV varia, principalmente, em virtude das perdas térmicas e dos materiais de todos os elementos que o compõem, quais sejam: células FV, inversores elétricos, controladores de carga e cabeamento. Essa perda descreve a relação entre a potência de saída real e a potência de saída teórica, e varia de acordo com mudanças no ambiente, em especial à temperatura atmosférica. Diversos estudos assumem essa taxa de eficiência como uma constante, e corresponde à 75% (ŠÚRI *et al.*, 2007; SUN *et al.*, 2013; WONG *et al.*, 2016).

Considerando essas características técnicas dos elementos que compõem os sistemas FV, procedemos os cálculos do potencial energético nominal e de saída para sistemas instalados no semiárido sergipano como um todo.

Para todos os cálculos, tomamos como pressuposto que os módulos FV estariam posicionados em uma inclinação ideal determinada pela latitude do local, que no caso do semiárido sergipano está entre 9º e 11º orientados para o Norte Verdadeiro, e que o coeficiente de fotoconversão é de 16% (PEREIRA *et al.*, 2007).

O potencial nominal E_n representa a quantidade máxima de energia capaz de ser gerada pelos módulos FV em um determinado período de tempo. Desta forma, para encontrarmos esse valor para cada pixel do mapa, utilizamos a equação 5.11 (ŠÚRI *et al.*, 2007; HOFIERKA; KARNUK, 2009; WONG *et al.*, 2016).

$$E_n = R_m \cdot A_{fv} \cdot \eta \tag{5.11}$$

Onde R_m é a radiação global média em um determinado período de tempo (kWh/m^2), A_{fv} é a área da superfície dos módulos FV (m^2) e η é o coeficiente de fotoconversão dos módulos FV. A unidade de medida é em kWh.

O potencial de saída E_{out} representa a quantidade efetiva de energia elétrica gerada pelo sistema FV. Para tanto, empregamos a equação 5.12, onde incluímos na equação de potencial nominal (5.11) as perdas do sistema (ŠÚRI *et al.*, 2007; WONG *et al.*, 2016).

$$E_{out} = E_n \cdot TE_s = R_m \cdot A \cdot \eta \cdot TE_s \tag{5.12}$$

Onde TE_s é a taxa de eficiência do sistema FV. A unidade de medida é em kWh.

Apesar de, no nosso mapa com resolução espacial de 30 metros, cada pixel possuir 900 m^2 de área, as exigências técnicas para instalação dos arranjos de módulos FV não permitem que toda a área seja ocupada, sendo necessários espaçamentos entre eles para

evitar sombreamentos e permitir a manutenção dos mesmos.

5.3.5.3 Área ocupada pelos arranjos FV

Numa instalação FV, os módulos precisam ser arranjados afim de otimizar a recepção dos raios solares e evitar a projeção das sombras entre eles, maximizando a superfície exposta ao Sol (PEREIRA *et al.*, 2007). Isso significa que a área disponível para o empreendimento não deve ser totalmente ocupada pelos módulos FV, uma vez que estes normalmente não são instalados paralelamente ao solo, mas em uma inclinação ideal, e evitando-se o sombreamento entre eles.

Assim é necessário estimarmos a área efetivamente ocupada pelos arranjos FV, considerando a sombra projetada pelos módulos quando instalados em uma estrutura de suporte. E então, podemos calcular quantos módulos cabem em cada pixel do mapa e qual a área da superfície dos módulos que efetivamente estarão expostas aos raios solares. Essa informação é essencial para os cálculos do potencial técnico.

Para calcularmos a sombra projetada de um objeto é necessário conhecer o ângulo zenital solar[1] ao meio-dia, e a declinação solar no Solstício de Inverno, dia em que o sol apresenta a menor altura solar[2] e temos a menor quantidade de horas de sol no ano. No hemisfério sul, o Solstício de Inverno ocorre no dia juliano 172, ou 21 de junho.

Para obtermos a declinação solar (δ) e o ângulo zenital ao meio-dia (Z_{12}) utilizamos, respectivamente, as equações 5.13 e 5.14 (PEREIRA *et al.*, 2007).

$$\delta = 23,45 \cdot sen[360 \cdot (DiaJuliano - 80) \div 365] \tag{5.13}$$

$$Z_{12} = \delta - \phi \tag{5.14}$$

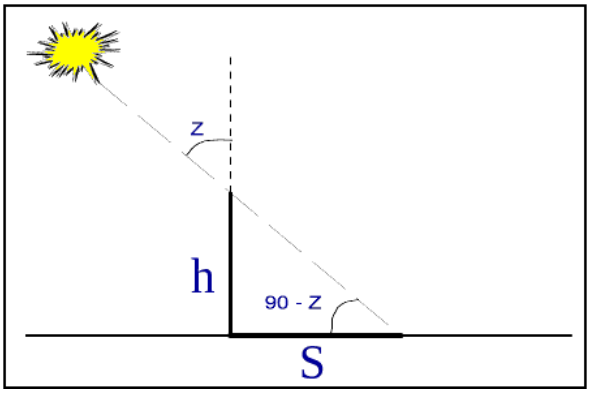
Onde ϕ corresponde à latitude do local. Quase a totalidade do semiárido sergipano se localiza na latitude 10º, que na equação deverá ser inserida com sinal negativo por estar no hemisfério sul. Aplicando as equações obtemos que, para a área estudada, δ = 23,448º e Z_{12} = 33,448º.

Pela figura 14 observa-se que, quando o Sol faz um ângulo zenital Z, um objeto de altura h projeta uma sombra de comprimento S. Portanto, o comprimento da sombra do objeto pode ser estimado sabendo-se o ângulo zenital solar para determinado horário do dia. Por trigonometria obtem-se a equação 5.15 (PEREIRA *et al.*, 2007):

$$S = h \cdot tan(Z) \tag{5.15}$$

[1] Ângulo zenital solar corresponde ao ângulo entre o zênite e o centro do disco solar.
[2] Altura do sol em relação à linha do horizonte.

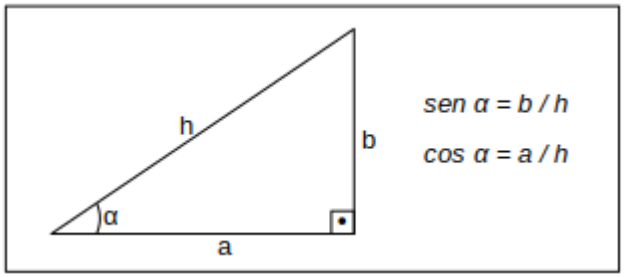
Figura 14: Projeção da sombra S, de um objeto com altura h



Fonte: Pereira *et al.* (2007).

Também pelas relações trigonométricas do triângulo retângulo, é possível obtermos a altura e o comprimento projetado no solo de um objeto a partir de suas dimensões e seu ângulo de inclinação (figura 15).

Figura 15: Trigonometria no triângulo retângulo



Fonte: Elaborado pelo autor.

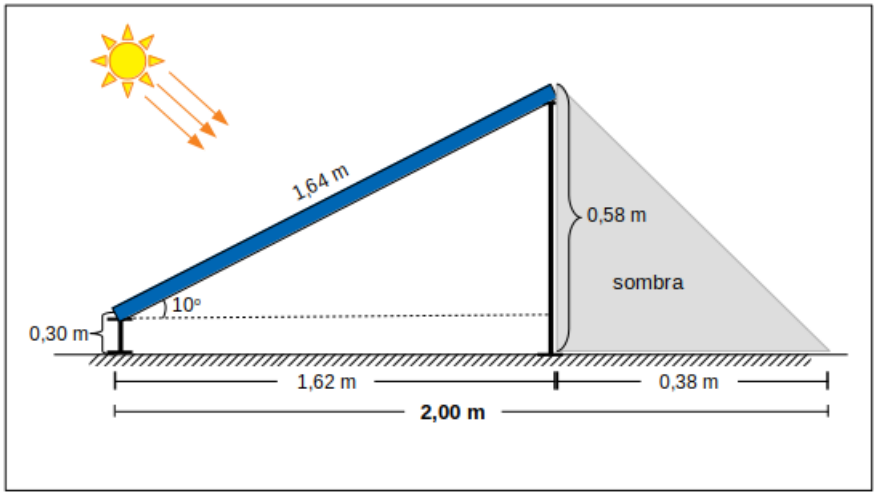
A fim de evitarmos especular uma configuração ideal para os arranjos FV, uma vez que isso depende de critérios do fabricante, das dimensões e capacidade de carga dos suportes utilizados e das características dos demais componentes de conexão e controle; vamos levar em conta somente o ângulo de inclinação ideal e as dimensões dos módulos FV, além de uma estrutura mínima essencial para manter a inclinação de 10º e uma altura mínima do solo de 0,30 m.

Na avaliação dos módulos FV comercializados no Brasil feita pelo Inmetro, as dimensões mais recorrentes entre os fabricantes são de 1,64 x 0,99 m (INMETRO, 2017), as quais vamos tomar como padrão. Assim, o arranjo de um único módulo que definimos para nossa pesquisa teria dimensões de acordo com a figura 16.

Quanto à forma de interconexão elétrica dos módulos e as especificações dos demais componentes eletro-eletrônicos, não iremos tratar neste estudo, pois os cálculos envolvidos não interferirão na ocupação do terreno. Também estamos ignorando quaisquer outras edificações ou facilidades necessárias ao funcionamento das usinas.

A partir dessas definições e dimensionamentos para o modelo de arranjo FV definido, temos os seguintes dados:

Figura 16: Vista lateral do arranjo FV



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Área da superfície do módulo FV padrão

$$1,64 \cdot 0,99 = 1,6236\ m^2 \tag{5.16}$$

- Área do solo necessária para instalação de 01 arranjo FV

$$2,00 \cdot 0,99 = 1,98\ m^2 \tag{5.17}$$

- Quantidade máxima de arranjos por pixel

$$900 \div 1,98 = 454\ arranjos \tag{5.18}$$

- Área total de superfície FV por pixel

$$454 \cdot 1,6236 = 737,11\ m^2 \tag{5.19}$$

Destarte, temos que a superfície máxima aproveitável em cada pixel é de aproximadamente 737 m^2, e poderemos estimar de forma mais próxima a um cenário real, a quantidade de energia FV que poderia ser gerada anualmente em cada pixel disponível na área de estudos.

5.3.6 Avaliação dos impactos da nova fonte de energia

A abordagem interdisciplinar é matéria inerente ao nosso programa de pesquisa, envolvendo as três dimensões do desenvolvimento sustentável: econômica, ambiental e social. Nesta etapa final, avaliamos os impactos da inserção da fonte energética solar FV na região semiárida sergipana e seus efeitos para o estado de Sergipe. A avaliação considerou os impactos em três áreas: energética, ambiental e socioeconômica.

5.3.6.1 Impactos energéticos

Para visualizarmos os impactos que essa nova fonte de energia poderia provocar do ponto de vista energético, avaliamos a inserção da energia elétrica FV estimada na área de estudos confrontando com dados do Balanço Energético Nacional 2020 ano base 2019 (BEN) (EPE, 2020) e dos Planos Nacionais de Energia (PNE) 2030 e 2050 (MME-EPE, 2007; MME-EPE, 2018b), identificando as potencialidades energéticas para Sergipe e suas fontes. Tais documentos servem para que o governo brasileiro desenhe estratégias de desenvolvimento nacional.

É importante ressaltar que o PNE 2030 e o PNE 2050 foram publicados respectivamente nos anos 2007 e 2018 (MME-EPE, 2007; MME-EPE, 2018b), e em virtude da pandemia do vírus COVID-19 e das medidas de isolamento social adotadas, ambos podem estar completamente comprometidos devido à elevada incerteza sobre a evolução da economia e do consumo de eletricidade nacional. Por esse motivo, os dados de geração, comercialização e consumo de eletricidade que empregamos na pesquisa se referem àqueles contidos no BEN 2020 ano base 2019, evitando o uso de dados gerados em um cenário completamente averso à normalidade no que tange ao consumo de energia elétrica no Brasil.

Os resultados obtidos na pesquisa foram confrontados com os dados de balanço e estimativas da EPE para analisarmos o cenário energético com a inclusão da energia elétrica FV potencialmente gerada no semiárido de Sergipe. Compreendendo que nem todas as áreas disponíveis para implantação de usinas FV centralizadas poderiam ser ocupadas, definimos um cenário hipotético onde somente 0,5% no potencial solar fosse aproveitado.

Nossa análise focou principalmente nos dados de geração e consumo elétrico, bem como nos dados referentes à geração e capacidade instalada hidro e termoelétrica no estado de Sergipe.

5.3.6.2 Impactos ambientais

Dados do último Anuário Estatístico de Energia Elétrica (MME-EPE, 2020a) relacionam a quantidade de gases do efeito estufa (GEE), e apontam que no ano de 2019, somente o setor elétrico brasileiro foi responsável pela emissão de 56,3 Milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente[3](CO_2e) na atmosfera, provenientes em maior parte das fontes termoelétricas. E, em 2020, haviam 76 novas usinas termoelétricas em construção no país, em contrapartida, apenas 15 novas usinas FV estavam em construção.

[3] O Dióxido de Carbono equivalente é a unidade utilizada para as estimativas de emissões de GEE, que incluem as emissões de todos os gases previstos nos inventários do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), incluindo dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (SEEG, 2019).

Portanto, quanto aos impactos ambientais, realizamos uma análise comparativa das emissões de GEE das fontes termoelétricas (gás natural, óleos derivados de petróleo e carvão) e da fonte FV, no aproveitamento dos mesmo 0,5% do potencial solar estimado para a região semiárida sergipana. Para tanto calculamos o Fator de Emissão das fontes de energia termoelétricas, tomando como base os dados da MME-EPE (2020a). O cálculo desse fator permite saber a quantidade de CO_2e emitido por Wh gerado para cada fonte, levando em conta que no processo de geração elétrica a fonte FV não produz GEE (ALVIM *et al.*, 2010).

5.3.6.3 Impactos socioeconômicos

No cenário mundial, os recursos de energia solar não somente ajudam as pessoas provendo energia térmica e elétrica, mas também pode ser fonte geradora de bem-estar socioeconômico. O incentivo e desenvolvimento dessa tecnologia estão relacionados principalmente ao impacto financeiro no custo de vida, especialmente em termos de uso da energia. Esse bem-estar socioeconômico pode ser mensurado baseado em oportunidades de empregos, melhoria de renda e de estilo de vida (ALAM *et al.*, 2016).

A avaliação dos impactos socioeconômicos em nossa pesquisa observou três pontos: a) potencial de geração de empregos; b) tarifação e subsídios para a energia FV centralizada, e; c) custo da geração FV em relação às outras fontes. Todos os pontos abordados influenciam diretamente na melhoria da renda familiar que, consequentemente, impactam na qualidade de vida das pessoas.

A geração de empregos está diretamente ligada ao aumento da renda e à necessidade de incremento da educação formal e técnica, principalmente quando existe a instalação de indústrias de equipamentos e insumos para fabricação de componentes.

Em relação aos empregos no Brasil, o trabalho de Rodrigues *et al.* (2018) apresenta dados de que há uma estimativa de criação de 33 vagas por MW instalado. O trabalho de Carstens e Cunha (2019) cita que, segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), que congrega empresas da cadeia produtiva da tecnologia FV, existe um potencial de geração de 20 a 30 empregos diretos e indiretos por ano para cada MW instalado. Já para Heideier *et al.* (2020), que toma dados da Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS), uma associação envolvida em pesquisas e estudos sobre a energia solar, esses números variam entre 25 e 30.

Assim, analisamos os estudos supramencionados para verificar se essa relação entre energia solar e criação de empregos existe quando se trada do modelo de geração FV centralizada, uma vez que esses estudos se referem ao modelo de geração distribuído.

A geração de emprego e o consequente aumento da renda, evidentemente melhora a qualidade de vida das pessoas, especialmente de regiões com baixos índices de desen-

volvimento humano como é o semiárido nordestino. Entretanto, nem todos os habitantes seriam beneficiados diretamente, ainda mais aqueles que fazem parte dos estratos mais pobres e que não teriam facilidade de acesso à educação técnica, tão necessária para atender à demanda deste mercado. Destarte, um outro caminho que o Estado pode tomar para beneficiar a parcela mais carente da população seria com uma tarifação diferenciada da energia para famílias integrantes de programas assistenciais.

Neste quesito, buscamos discriminar mecanismos de tarifação especial para energia solar que já estejam implementados ou que estejam em estudo pelo governo ou parlamento brasileiro.

O outro ponto de análise que também influencia no custo da energia e, consequentemente, na renda das famílias e na implementação de programas sociais, são os custos da geração elétrica. Neste ponto, tomando como base os dados apresentados pela EPE no PNE 2050 (MME-EPE, 2018b), fizemos uma análise comparativa entre os custos com operação e manutenção da fonte FV e das fontes de energia elétrica existentes em Sergipe: hidroelétrica, eólica e termoelétrica à gás natural.

5.4 Limitações e fatores de incerteza

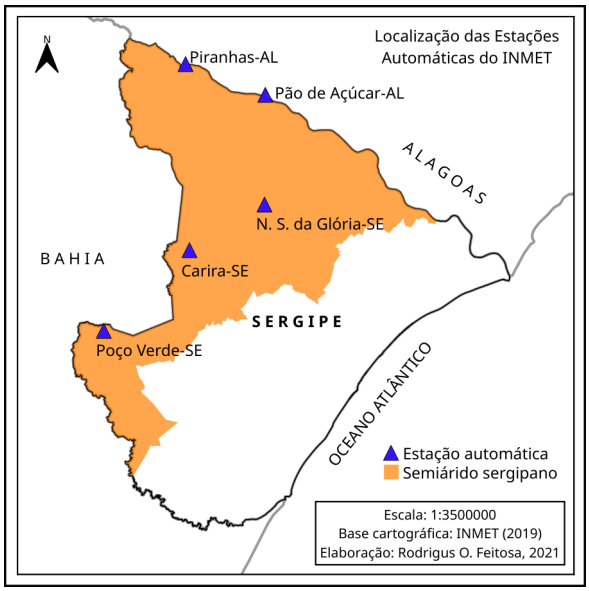
Durante nossa pesquisa e na coleta de dados preliminares para o processamento do módulo r.sun, foram identificados alguns fatores que limitaram a possibilidade de se obter resultados mais precisos e mesmo validá-los com maior confiabilidade. Assim, apresentamos aqui as limitações e os fatores que eventualmente geraram incertezas nos resultados da pesquisa.

5.4.1 Estações meteorológicas

Para o cálculo do Kc e validação dos resultados obtidos na modelagem da radiação solar seria mais adequado o uso de medições realizadas por sensores radiométricos instalados na própria área de estudos conforme realizado por Pintor *et al.* (2015), porém isso foi completamente comprometido em virtude do reduzido número de estações meteorológicas na área estudada e da grande inconsistência de suas leituras, que apresentaram diversas falhas no período da pesquisa. Na área estudada existem somente 03 estações automáticas, nos municípios de Nossa Senhora da Glória, Carira e Poço Verde, outras duas estações que buscamos dados se localizam na divisa com o Estado de Alagoas, nos municípios de Pão de Açúcar e Piranhas (figura 17).

O uso desses dados no cálculo do Kc e na subsequente validação da modelagem ficou impossibilitado, nos deixando como alternativa, o uso dos dados do ABES para validação, e do Atlas Solar Global para cálculo do Kc (PEREIRA *et al.*, 2017; SOLARGIS, 2019).

Figura 17: Estações meteorológicas automáticas mais próximas da área de estudos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2 Cálculo do Kc

O projeto do Atlas Solar Global somente fornece dados anuais de radiação global média (SOLARGIS, 2019), não há dados mensais para as componentes solares direta, difusa ou global. O que significa que o valor que calculamos para Kc é baseado na média anual, fato que nos leva a desconsiderar as variações de nebulosidade sazonais.

Outra incerteza provocada pela ausência de valores mais atualizados e fidedignos dessa variável foram os cálculos de potencial solar da área. Para um resultado mais acurado, seriam necessários dados de nebulosidade e transmissividade da atmosfera coletados dentro da área de estudos, e por um longo período de tempo. Destarte, foi necessário empregarmos dados de radiação solar global para o céu claro, que resultará em valores de potencial de radiação maiores que o que efetivamente ocorre.

Na pesquisa que produziu o ABES (PEREIRA *et al.*, 2017), o índice Kc foi determinado com o uso de uma rede de sensores radiométricos e interpolação para determiná-lo para todo o país, além do uso de mais de 17 anos de dados de satélites e o emprego de vários institutos para aumentar os níveis de confiança sobre a variabilidade espacial e temporal da radiação solar. Porém, preferimos empregar os dados desse atlas na validação de nossa pesquisa, uma vez que fornece dados mensais e medidos exclusivamente em território nacional.

5.4.3 Resolução espacial das imagens para áreas urbanas

Mesmo a resolução espacial de 30 m do MDE utililizado na pesquisa sendo considerada alta para estudos que envolvam análise do terreno, para áreas urbanas é considerada muito baixa, o que dificulta a acurácia das análises. Para a geração de um MDE ou

um MDS de uma área com resoluções ainda mais altas (5m, por exemplo), seria necessário o emprego da tecnologia LiDAR, já que os satélites existentes com as maiores resoluções disponíveis não possuem instrumentos sensores capazes de prover os dados necessários para geração desses modelos.

E na inexistência de um MDS para o estado de Sergipe, não é possível estimar por um SIG o potencial FV nas coberturas urbanas, algo que poderia ter um grande impacto econômico e social.

5.4.4 Mapas temáticos agrícolas

Os mapas de viabilidade agrícola dos solos e dos projetos de perímetros irrigados não foram encontrados nas páginas eletrônicas dos órgãos estaduais e federais responsáveis.

A ausência desses dados prejudicou a análise dos locais ideais para instalação de usinas FV, uma vez que se tratam de dados que poderiam identificar áreas nobres para a produção de alimentos.

Parte IV

Resultados e Discussões

6 Resultados e Discussões

6.1 Parâmetros para modelagem

Para a modelagem da radiação solar em um SIG precisamos utilizar basicamente dados em formato de mapas raster, porém não existem bases de dados prontas para todos os parâmetros necessários, desta forma para aqueles existentes somente precisamos organizar e recortar os mapas para a área de estudos, e alguns outros conseguimos gerar a partir do MDE que obtivemos do Projeto Topodata (INPE, 2020). Porém, foi necessário produzir mapas a partir de dados não espaciais referentes a dois parâmetros essenciais para a modelagem, que foram os mapas de albedo da superfície e de TL.

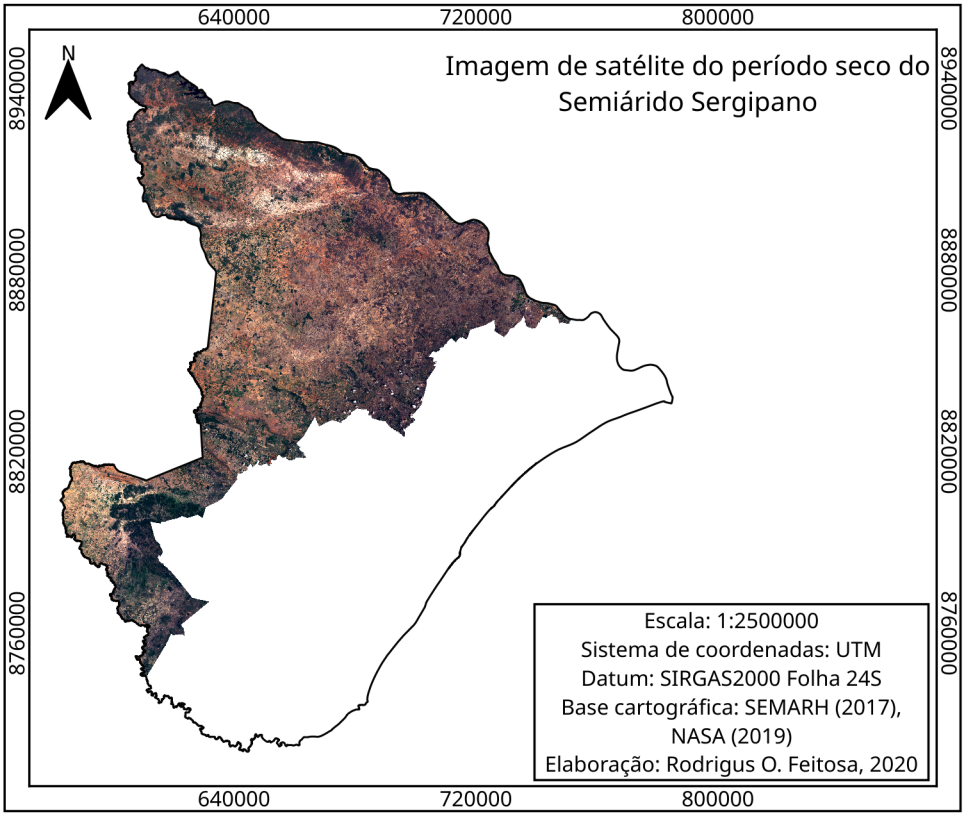
6.1.1 Imagens de satélites

As imagens LANDSAT 8 obtidas para os cálculos de albedo obtidas no serviço online EarthExplorer da USGS que atenderam aos requisitos definidos na nossa metodologia, foram capturadas nos dias 12/06/2017, 08/12/2018 e 04/07/2019 (NASA, 2019b).

Como as imagens de satélites são capturadas e disponibilizadas em forma de mosaicos (várias capturas independentes), primeiramente foi necessário unir os arquivos de dados de cada banda espectral dos pontos 067 e 068, e assim gerarmos uma única imagem para cada data de captura, sobre a qual aplicamos a ferramenta de recorte do SIG para extrair a área de estudos.

As imagens do dia 08/12/2018 (período seco) (figura 18) se mostraram bastante limpas de nuvens e não foi necessário nenhum outro procedimento para serem utilizadas na pesquisa.

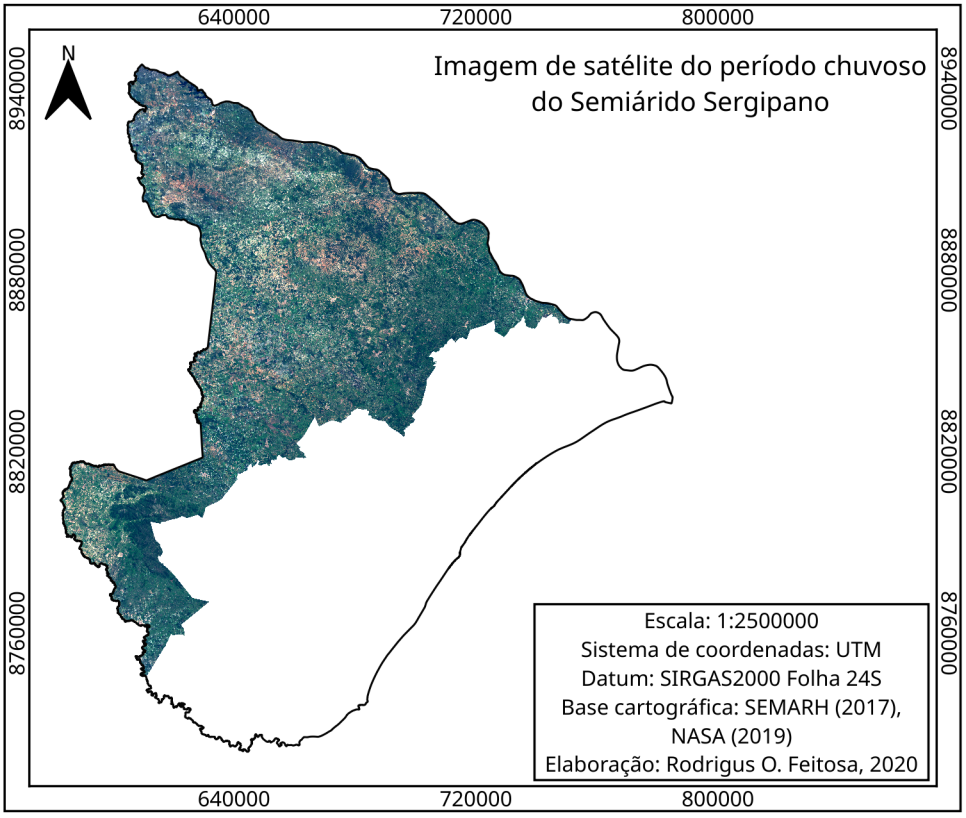
Figura 18: Imagens LANDSAT 8 do semiárido sergipano no período seco



Fonte: Elaborado pelo autor.

Porém, não havia uma única imagem capturada no período chuvoso da região que apresentasse as mesmas condições de céu claro. Assim, para obtermos esse produto foi necessário a utilização de duas imagens capturadas em datas distintas e com o mínimo de nuvens possível, sobre as quais aplicamos procedimentos de mascaramento das nuvens e posterior sobreposição dos dados, conseguindo um resultado bastante satisfatório (figura 19).

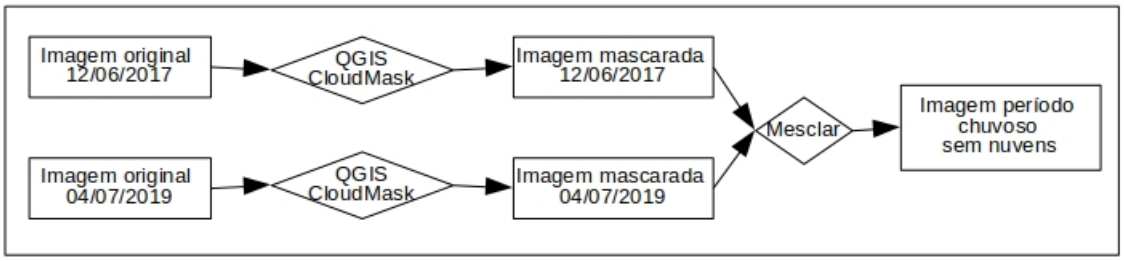
Figura 19: Imagens LANDSAT 8 do semiárido sergipano no período chuvoso



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para gerarmos essa imagem para o período chuvoso, aplicamos o filtro de mascaramento de nuvens CloudMasking do QGIS, que utiliza um algoritmo para detectar nuvens e suas sombras (OSGEO, 2019). Esse procedimento cria uma nova imagem inserindo valores nulos nos pixels identificados como nuvens e sombras, por isso foi necessário utilizarmos duas imagens capturadas em datas diferentes, tornando possível preencher esses valores nulos com dados válidos uma vez que as posições das nuvens não coincidem em ambas as datas. A figura 20 ilustra como o procedimento foi aplicado nas imagens capturadas nos dias 12/06/2017 e 04/07/2019.

Figura 20: Procedimento de mascaramento de nuvens em imagens de satélite



Fonte: Elaborado pelo autor.

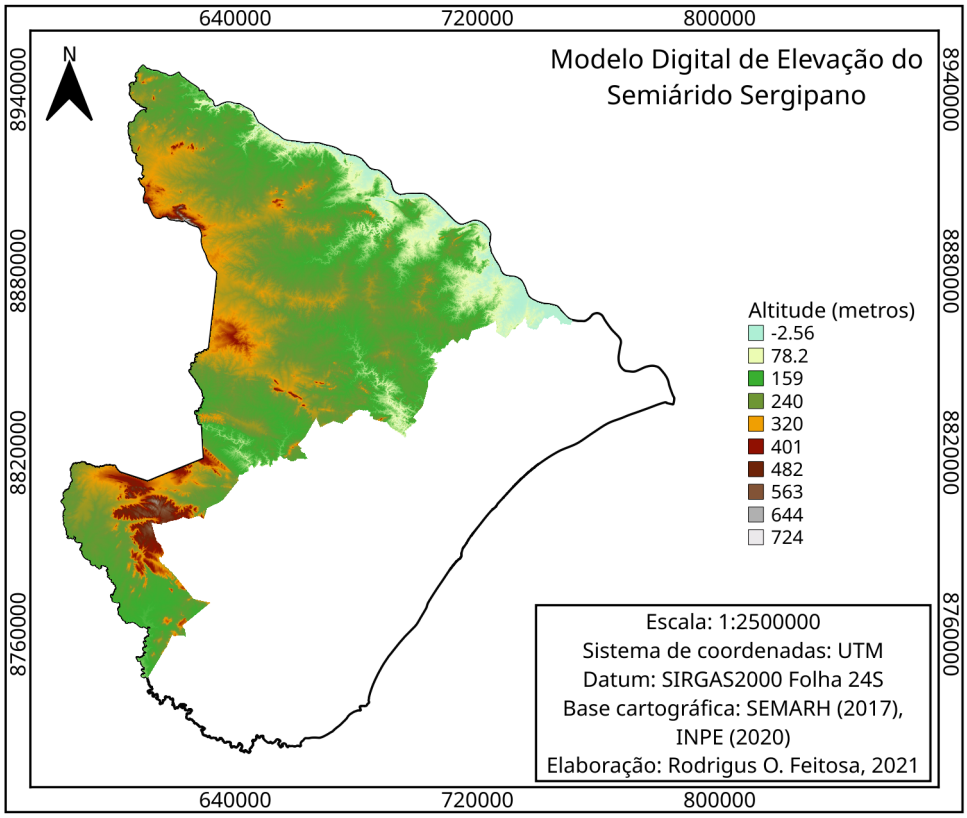
Observando as imagens coloridas do satélite LANDSAT 8, podemos ver claramente as diferenças na cobertura vegetal no semiárido para ambos os períodos. Destacando-se as cores verdes da vegetação e a tonalidade mais escura da terra devido à umidade.

6.1.2 MDE

No serviço online do Projeto Topodata, as imagens são disponibilizadas em mosaicos e por tema, de forma que foi necessário fazer a mesclagem das folhas 09S39, 09S375, 10S39 e 10S375 correspondentes ao tema "Altitude", para que pudéssemos obter uma imagem da área que engloba o semiárido sergipano (INPE, 2020). Posteriormente procedemos com o recorte da imagem para extrairmos somente o mapa referente à nossa área de estudos (figura 21).

O MDE da área mostra que no semiárido sergipano, as altitudes variam entre -2,54 e 724 metros em relação ao nível do mar. A altimetria negativa se refere às áreas de várzea do Rio São Francisco. E o ponto de maior altitude se localiza na Serra Negra, no município de Poço Redondo, no Alto Sertão, próximo à divisa com o estado da Bahia (SEPLAG, 2010).

Figura 21: MDE do semiárido sergipano



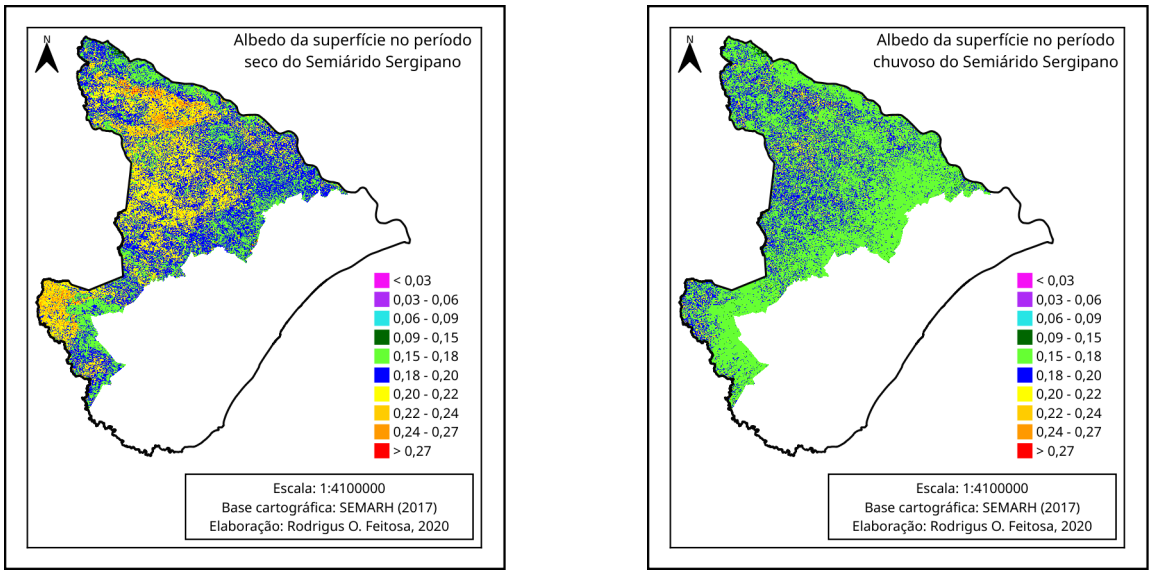
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.3 Albedo da superfície

Os mapas de albedo da superfície produzidos para o período seco (figura 22a) e chuvoso (figura 22b) da área estudada são apresentados abaixo. As áreas representadas com cores mais quentes (vermelho, laranja, amarelo) correspondem àquelas em que uma maior quantidade de radiação solar é refletida de volta para a atmosfera, ou seja, a su-

perfície em que os raios solares incidem é mais clara, como por exemplo: terra seca e sem vegetação. Enquanto que as cores mais frias (roxo, verde, azul) correspondem à áreas com menor refletividade, à exemplo de áreas verdes vegetadas, terra úmida e corpos d'água.

Figura 22: Albedo da superfície

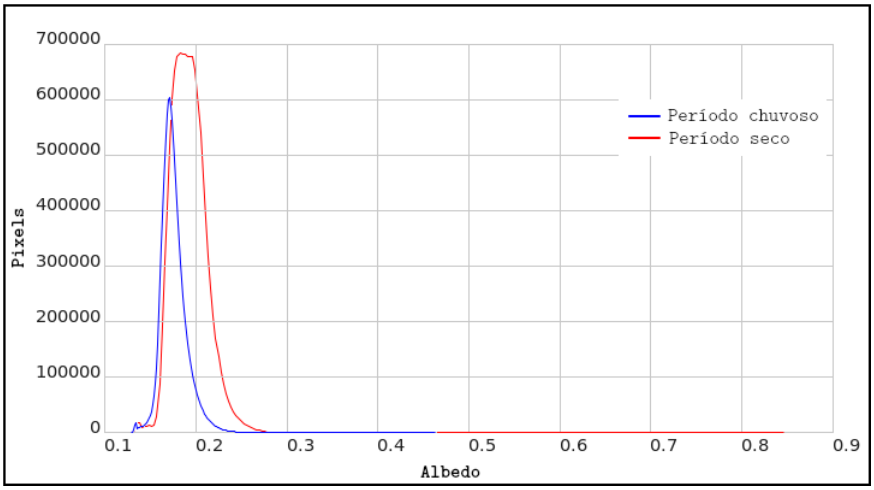


(a) Período seco (b) Período chuvoso

Fonte: Elaborado pelo autor.

A influência da umidade no albedo da superfície no semiárido causada pelas chuvas é notável, visualizado claramente pela diferença entre as imagens apresentadas, e pelo histograma com dados de ambos os períodos que podemos observar na figura 23.

Figura 23: Histograma do albedo da superfície



Fonte: Elaborado pelo autor.

O albedo da superfície no período chuvoso variou entre 0,13 e 0,46 com uma média de 0,18±0,014, sendo que a maior parte dos pixels apresenta albedo entre 0,15 e 0,20. No período seco, os valores variaram entre 0,13 e 0,85, com média de 0,19±0,019, e a maioria dos pixels entre 0,16 e 0,23.

Os valores de albedo acima de 0,31 e 0,39, respectivamente nos períodos chuvoso e seco, se apresentaram em um número muito pequeno de pixels, o que pode ser explicado pela presença de pequenas nuvens nas imagens do satélites que não foram possíveis de remover no processo de mascaramento.

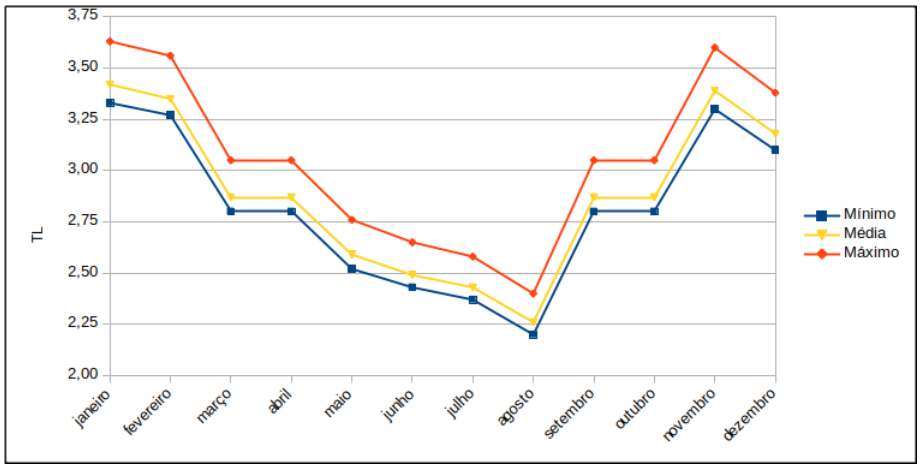
Os valores obtidos aqui estão de acordo com aqueles encontrados em outros estudos científicos para áreas com as mesmas características físicas e sazonais (DA SILVA *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2019).

6.1.4 TL

Produzido a partir dos dados do TL do Projeto SoDa e das medidas de elevação do MDE, os valores variaram entre 2,20 a 3,63 e apresentaram uma média anual de 2,88±0,39, como podemos observar na figura 24.

Destaca-se os menores valores mensais do TL entre os meses de março a agosto, que coincide com o período chuvoso na região, esse comportamento se explica devido a chuva ser um fator determinante na redução das partículas em suspensão na atmosfera.

Figura 24: TL no semiárido sergipano

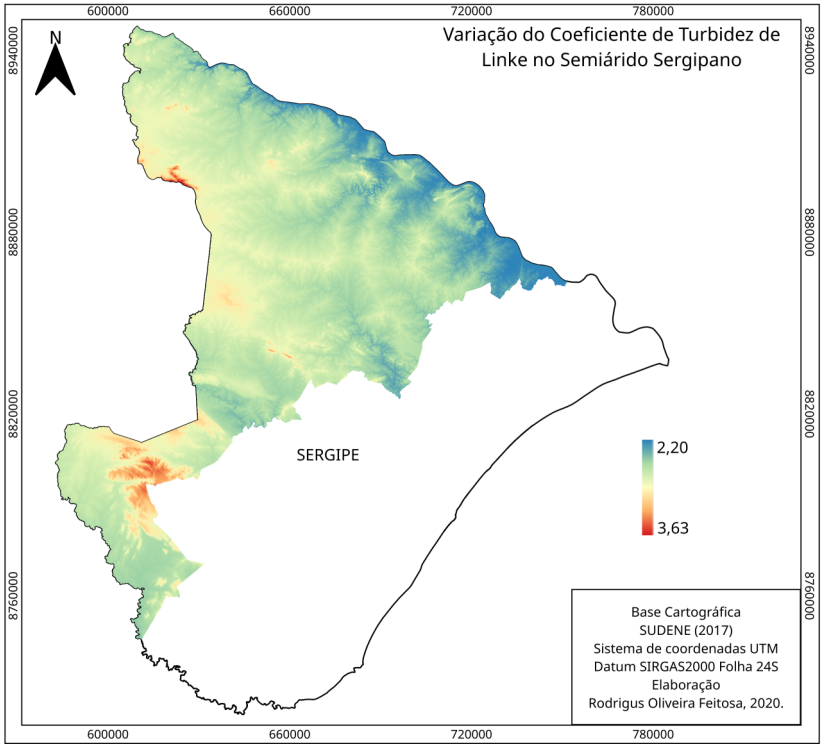


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Project SoDa (2003).

Na figura 25 podemos visualizar a variação do TL em todo semiárido sergipano.

De acordo com Huld (2017), o valor de TL varia influenciado pela altitude, e os resultados obtidos refletem isso, os menores valores foram observados ao longo do vale do Rio São Francisco, e os maiores na região da Serra Negra, no município de Poço Redondo, e no Planalto do Sudoeste Sergipano.

Figura 25: Variação do TL no semiárido sergipano



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2 Algoritmo de automação

O desenvolvimento do algoritmo proporcionou a eliminação de processos repetitivos e redução no tempo de processamento dos mapas de radiação solar, que ainda assim consumiu pouco mais de 26 horas no cômputo dos dados das três componentes da radiação em alta resolução espacial para os 365 dias do ano, e na geração dos mapas das médias mensais e anuais. O código fonte do algoritmo pode ser visto no Apêndice A.

Com este algoritmo é possível repetir o processo de modelagem para qualquer região do planeta mapeada por satélites, bem como, de forma simples, alterar os parâmetros da modelagem para obter diferentes resultados.

6.3 Modelagem da radiação solar

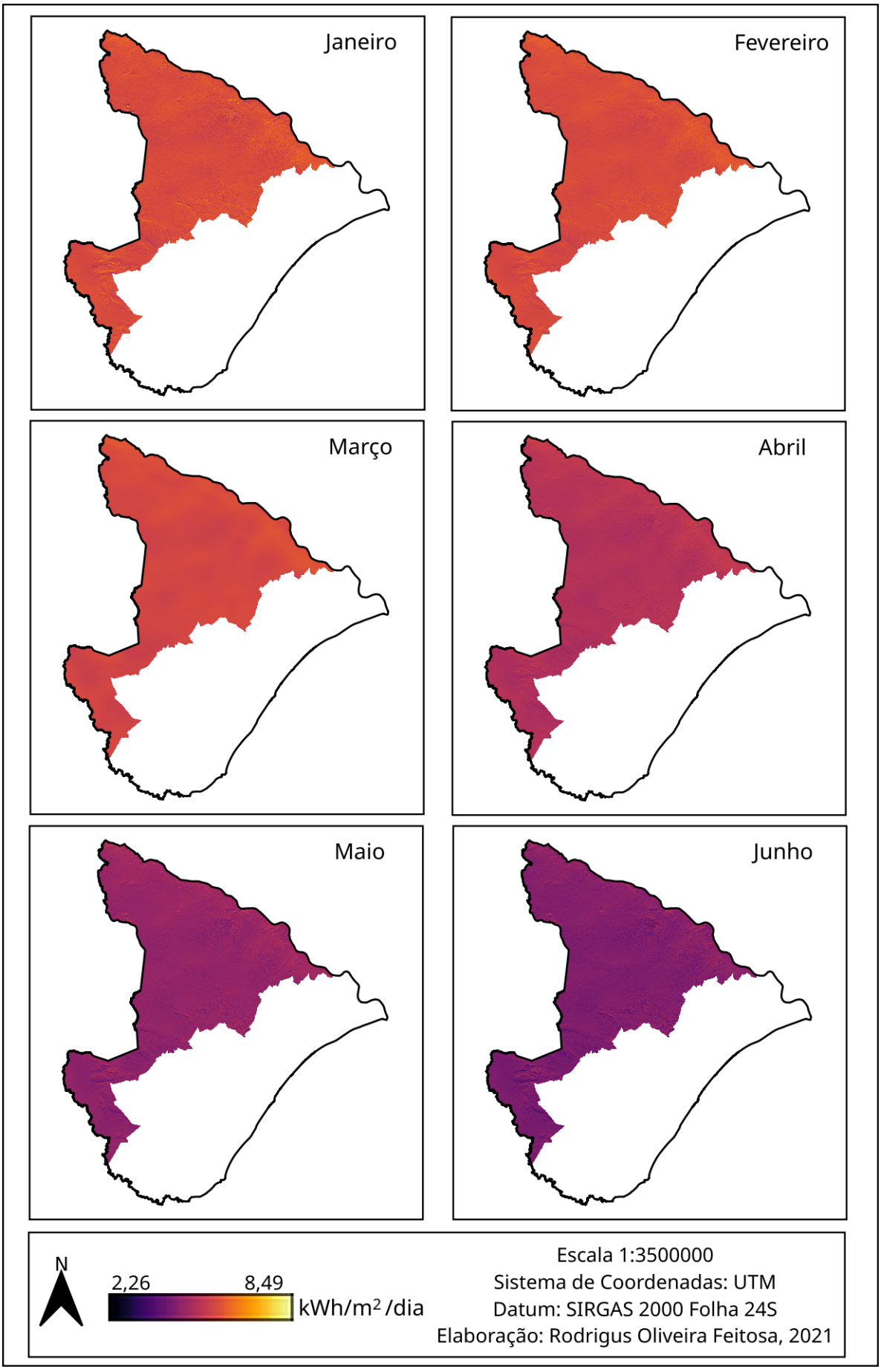
O processamento do módulo r.sun produziu mapas de radiação solar direta, difusa e global. Considerando que o principal componente solar para a geração de energia FV é a radiação global, vamos focar nossa análise e discussão sobre os resultados dessa componente.

Os mapas das componentes direta e difusa foram disponibilizados nos Apêndices B e C, de forma a constituir uma base de dados para uso por parte de futuras pesquisas,

ressaltando que os resultados se referem à radiação para o céu claro, por não haver dados suficientes para o cálculo do Kc específico para estas componentes solares.

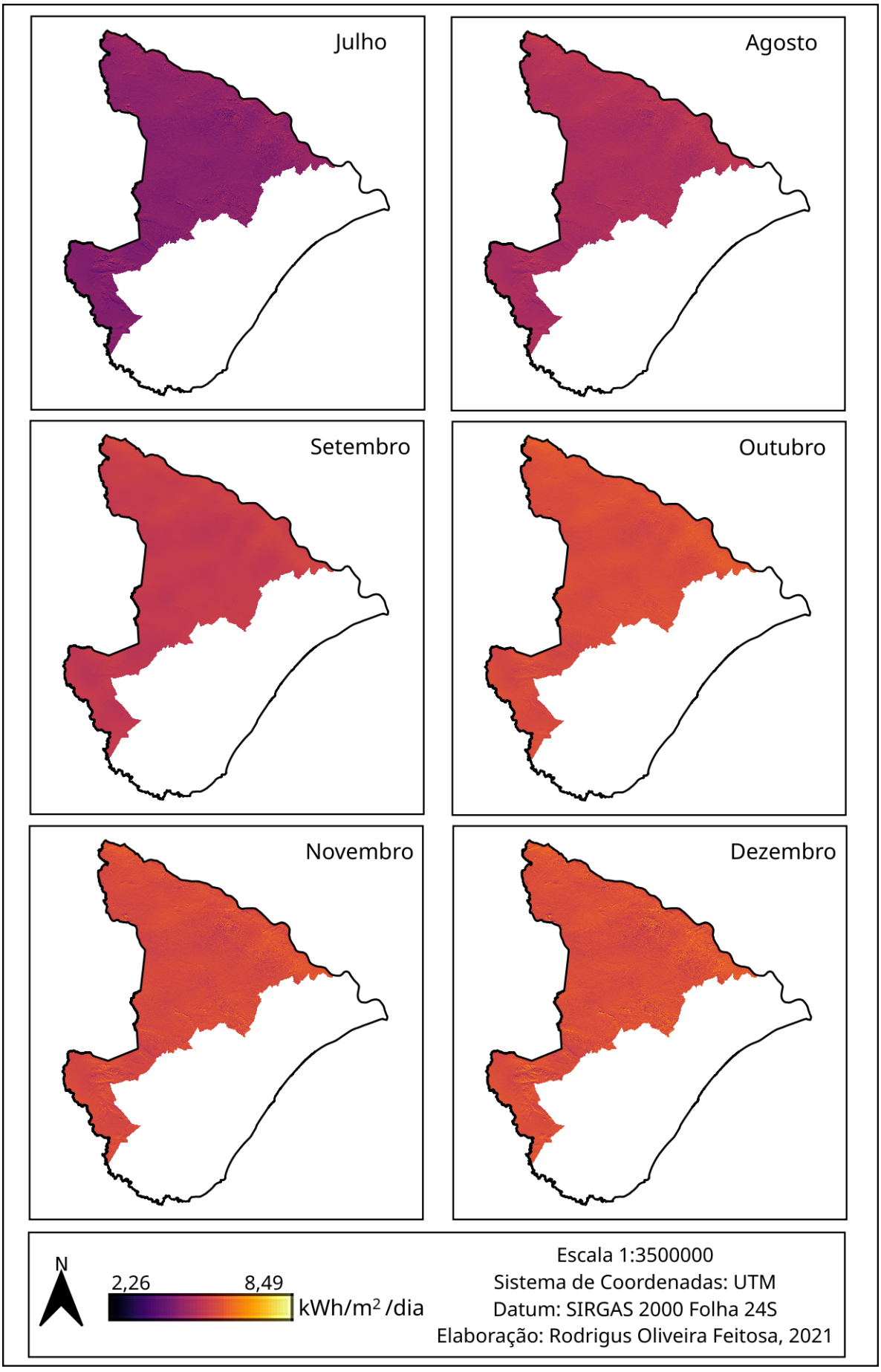
Como todos os mapas foram gerados partindo de um modelo solar para o céu claro, por meio da álgebra de mapas, realizamos os devidos cálculos para a obtenção dos dados de radiação para o céu real, com o coeficiente Kc encontrado a partir do Atlas Solar Global. Os mapas resultantes podem ser vistos nas figuras 26 e 27 onde destacamos a variação da radiação solar ao longo dos meses.

Figura 26: Mapa de radiação global média (1º Semestre)



Fonte: Elaborado pelo autor.

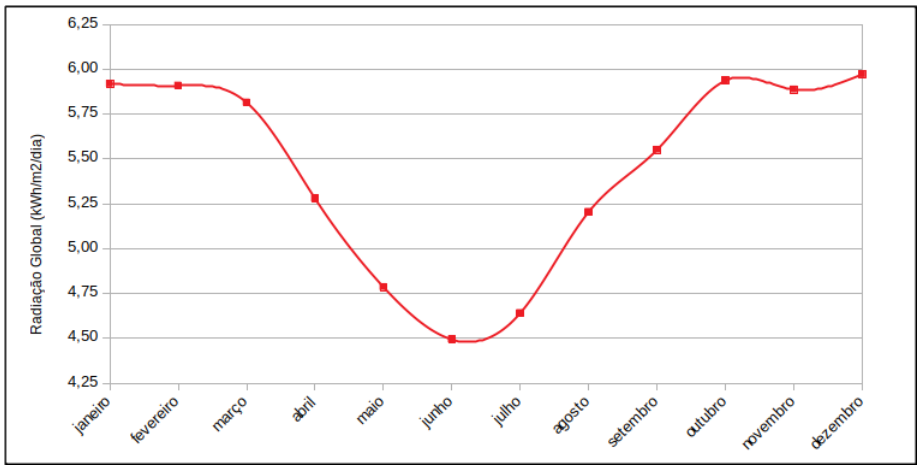
Figura 27: Mapa de radiação global média (2º Semestre)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando os mapas mensais é visível a redução da incidência da radiação solar na região semiárida sergipana a partir do mês de março, com menores índices entre junho e julho, e o pico de radiação ocorrendo nos meses de dezembro e janeiro. Essa característica se dá pelo fato de a região possuir apenas duas estações do ano bem definidas, uma chuvosa (de março a agosto) e outra seca (de setembro a fevereiro). Na figura 28 apresentamos o gráfico dos valores médios mensais:

Figura 28: Radiação global média



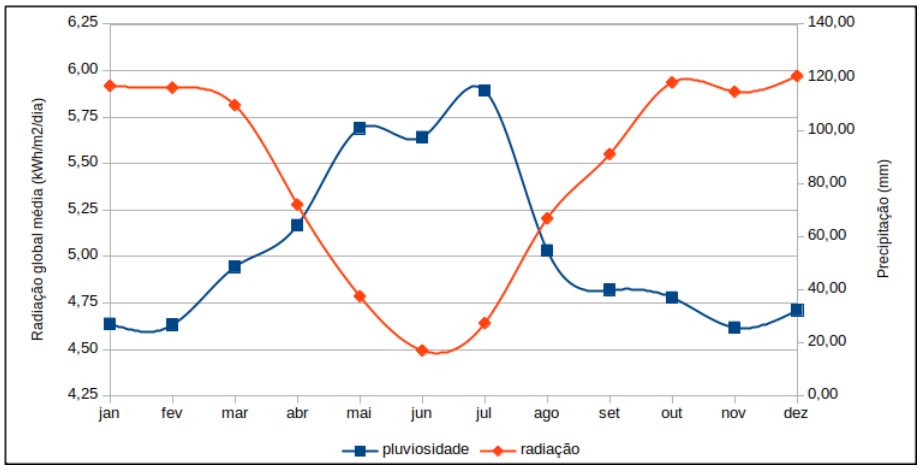
Fonte: Elaborado pelo autor.

A linha do gráfico se apresenta como uma curva de sino invertida que atinge o ponto mais baixo no mês de junho, no meio do período chuvoso, e maiores valores nos meses secos, principalmente entre outubro e fevereiro, corroborando com os dados já obtidos no ABES (PEREIRA *et al.*, 2017).

Obtivemos dados de precipitação média mensal nos municípios do semiárido sergipano no período de 2011 a 2021 coletados pela Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe, e quando os comparamos com os dados de radiação global modelada na região (figura 29), conseguimos compreender claramente a função complementar que a energia solar tem para com a fonte hidroelétrica, que é afetada nos períodos secos, principalmente em anos com estiagens prolongadas.

Essa complementaridade demonstra que a energia solar não é só uma opção de fonte energética limpa e renovável, mas uma necessidade para garantir a segurança energética em regiões sujeitas à períodos de seca (MME-EPE, 2018b).

Figura 29: Radiação global e pluviosidade média no semiárido sergipano

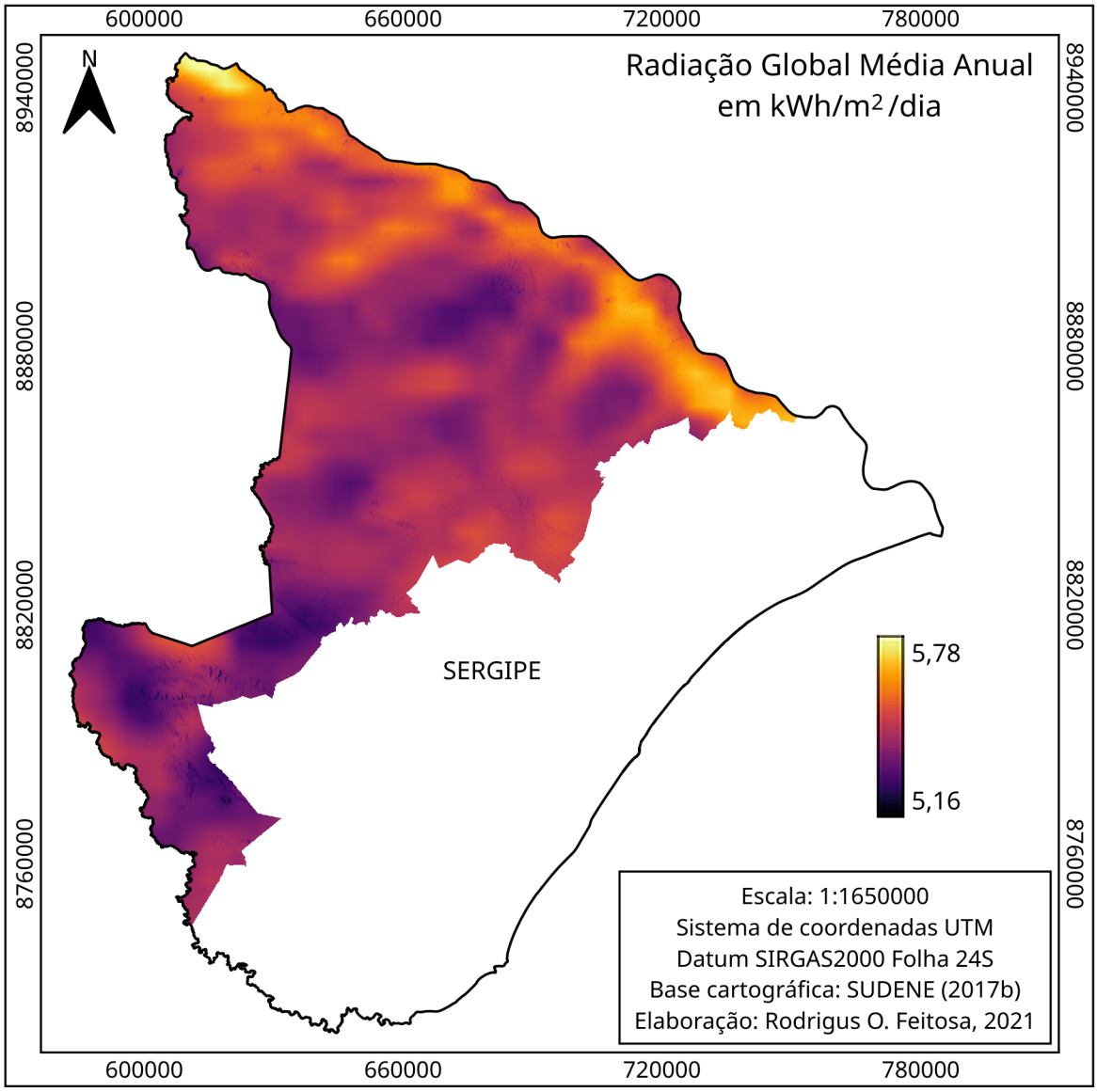


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de EMDAGRO (2021).

Baseado nos gráficos de radiação solar e pluviosidade, fica clara a influência que a nebulosidade tem sobre a quantidade de energia solar que pode ser gerada em cada período do ano, devendo ser esse um fator a ser considerado nos projetos FV, ainda que a previsibilidade dessa variável seja bastante difícil de se obter.

No mapa de radiação global média anual (figura 30) observamos maiores índices de radiação no extremo noroeste do estado, e ao longo do limite norte, que pode ser explicado pelo relevo da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, somado a menores valores de TL e a sua proximidade com a Linha do Equador, onde a distância Terra-Sol é menor. E, à medida que descemos no sentido sul, os valores da radiação tendem a diminuir principalmente devido ao aumento do TL, entretanto os maiores valores do albedo da superfície compensam essa redução visto que a amplitude da radiação solar em toda região é de apenas 0,62 kWh/m^2/dia.

Figura 30: Mapa da radiação global média anual



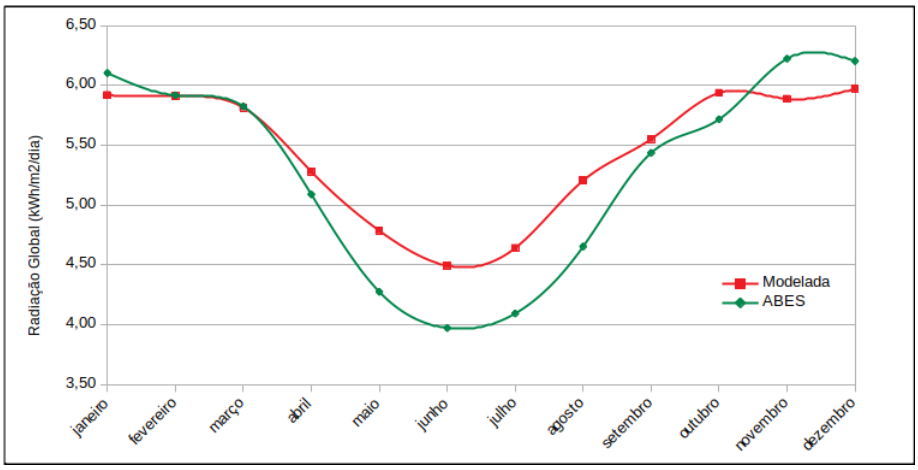
Fonte: Elaborado pelo autor.

O ABES também fornece os valores de radiação global calculados mensalmente, assim, é possível uma comparação mais confiável do ponto de vista temporal. Na figura 31 são mostrados os valores médios da radiação solar global modelada em nossa pesquisa e estimada no ABES (PEREIRA *et al.*, 2017).

Podemos observar da figura que as duas curvas possuem a mesma simetria, com valores superestimados pelo ABES nos meses de novembro a janeiro e subestimados entre abril e outubro, porém a diferença média ao longo do ano é de apenas 0,17 kWh/m^2/dia.

É importante salientar que a menor unidade de retenção de informações (o pixel) para os mapas do ABES é uma grade quadrada de 10 x 10 km, que não permite identificar alterações no relevo do terreno em qualquer lugar dentro de uma área menor que 100 km^2. Essa menor densidade de informações por unidade de área resulta em uma modelagem menos precisa dos efeitos do terreno, como por exemplo o sombreamento e, portanto,

Figura 31: Comparação da radiação global modelada e do ABES



Fonte: Elaborado pelo autor.

tende a haver uma superestimação dos dados de radiação.

Os mapas que modelamos nesta pesquisa possuem resolução espacial de 30 por 30 metros, isso significa que cada pixel representa uma área real de 900m^2, o que nos fornece uma granularidade de dados muito maior.

6.3.1 Validação da modelagem

Aplicamos sobre os dados de radiação global média anual que obtivemos na pesquisa as métricas utilizadas por Pintor *et al.* (2015) e definidas por Zhang *et al.* (2013), tendo como resultados os valores apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Métricas de avaliação da radiação

Métrica	Resultado
ETM	0,17 kWh/m^2/dia
EAM	0,28 kWh/m^2/dia
EPAM	6,03%
REQM	0,35 kWh/m^2/dia

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise das métricas aplicadas, podemos observar que os valores da ETM e EAM indicam que a radiação solar média anual modelada superestima aquela calculada no ABES (PEREIRA *et al.*, 2017) em um quantitativo muito baixo, considerando a grandeza da variável em estudo e o intervalo de tempo. E o EPAM é de 6,03% para o período de um ano.

E aplicando essas mesmas métricas para comparação dos dados mensais, obtivemos que a radiação modelada superestimou os resultados do ABES em média em 0,53 kWh/m^2/dia entre os meses de maio a agosto, período que também apresentou maiores valores de EPAM. Já no período de novembro a janeiro a ETM foi subestimada em média em 0,25 kWh/m^2/dia.

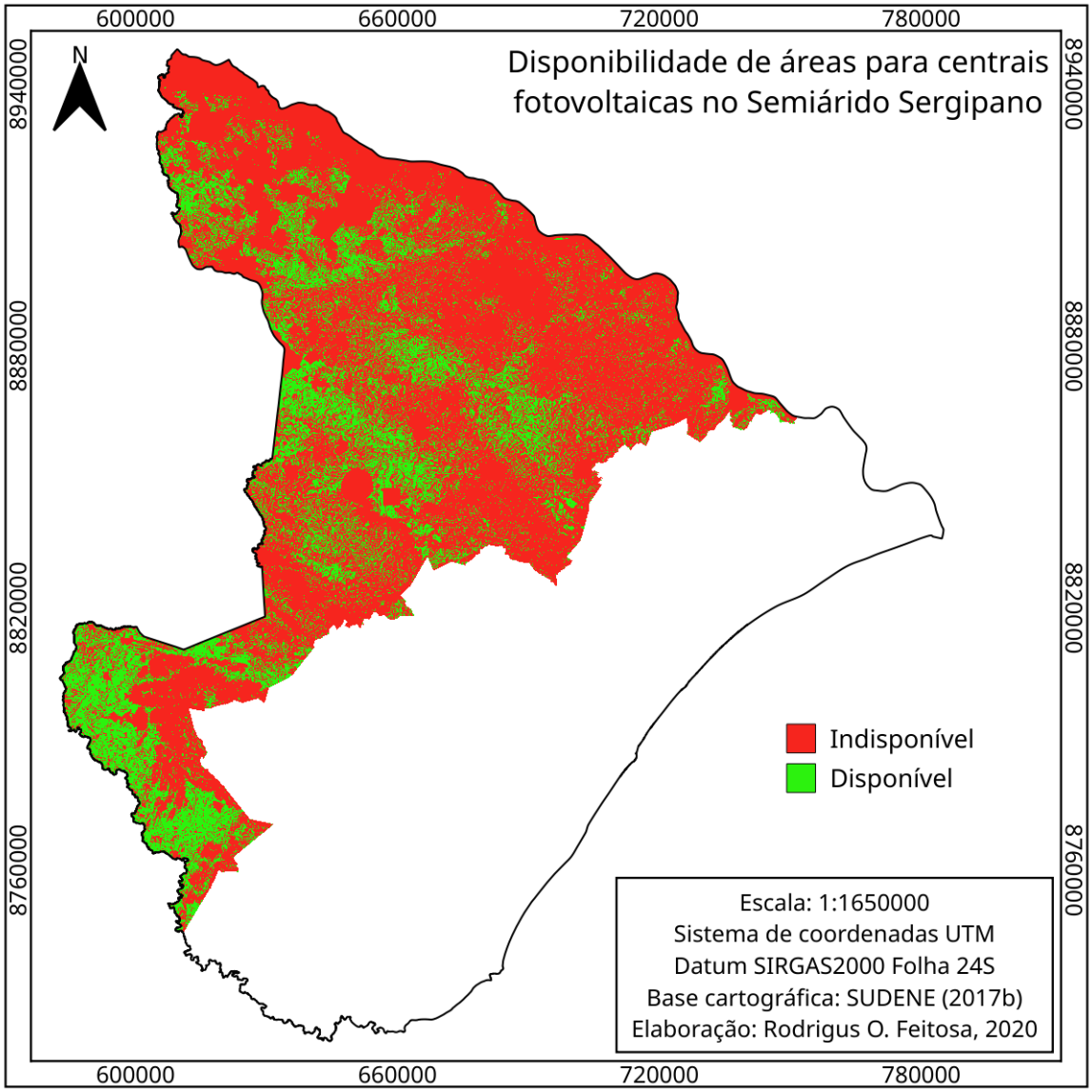
Assim sendo, diante do erro encontrado, podemos afirmar que a metodologia aplicada para a modelagem da radiação solar global é confiável.

6.4 Análise de locais para usinas FV

6.4.1 Mapeamento das áreas disponíveis

Após delimitar e organizar os dados referentes aos critérios negativos, que determinam a disponibilidade ou não de cada pixel no mapa raster, efetuamos a sobreposição de todos os mapas elaborados e o resultado obtido foi o mapa de disponibilidade de áreas para usinas FV (figura 32).

Figura 32: Mapa de disponibilidade de áreas para usinas FV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da modelagem mostraram que o valor mínimo da radiação global

média anual no semiárido sergipano ficou acima de 5,0 kWh/m^2/dia, e portanto não foi necessário utilizá-lo como critério negativo.

Segundo os dados obtidos, a soma das áreas disponíveis para instalação de módulos FV no semiárido sergipano é de 2.849,65 km^2 (tabela 4).

Tabela 4: Área disponível para sistemas FV no semiárido sergipano.

Município	Área (km^2)		Área Disp.
	Total	Disponível	Relativa (%)
Tobias Barreto	1.032,83	449,24	43,50
Poço Redondo	1.212,45	282,57	23,31
Carira	636,40	282,08	44,32
Nossa Senhora da Glória	756,49	223,56	29,55
Poço Verde	430,96	218,16	50,62
Canindé de São Francisco	902,25	183,43	20,33
Simão Dias	559,61	144,98	25,91
Nossa Senhora Aparecida	340,38	143,19	42,07
Porto da Folha	896,94	129,96	14,49
Frei Paulo	399,44	101,29	25,36
Monte Alegre de Sergipe	407,41	95,41	23,42
Feira Nova	188,01	79,27	42,16
Nossa Senhora das Dores	471,00	71,86	15,26
Graccho Cardoso	242,15	62,42	25,78
Ribeirópolis	261,55	58,99	22,55
Gararu	644,72	55,50	8,61
Aquidabã	357,00	46,78	13,10
Cumbe	129,20	38,33	29,67
Pinhão	155,89	33,86	21,72
Propriá	95,04	28,42	29,90
Pedra Mole	81,62	23,44	28,72
Itabi	195,09	18,83	9,65
Macambira	137,37	18,78	13,67
Canhoba	170,05	16,05	9,44
São Miguel do Aleixo	144,54	15,95	11,04
Cedro de São João	79,59	9,16	11,51
Nossa Senhora de Lourdes	80,42	8,40	10,44
Telha	49,45	7,78	15,74
Amparo do São Francisco	35,17	1,96	5,59
TOTAL	11.068,38	2.849,65	100

O principal critério de indisponibilidade identificado foi a declividade do terreno. Os dados mostraram que 61,24% de todo o semiárido sergipano, o equivalente a 6.778,60 km^2, possui um relevo com declividades acima de 4%. Isso significa que somente este critério já representa a quase totalidade da área classificada como indisponível. Uma pequena diferença de 0,70% entre a área total indisponível e as áreas com declividade acima de 4%, correspondem aos outros critérios negativos que não se sobrepõem à declividade.

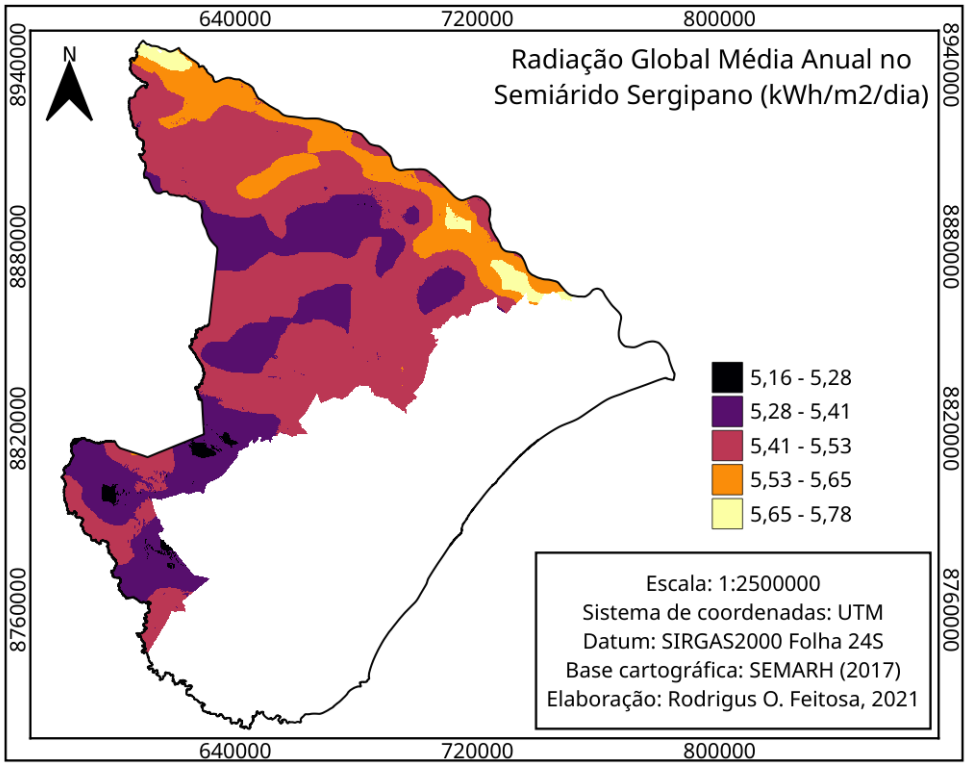
É importante ressaltar que, em empreendimentos de grande porte, existe a pre-

visão legal de se resguardar uma área concernente à Reserva Legal, imposta pelo Código Florestal Brasileiro; para o bioma caatinga a área reservada deve ser de ao menos 20% de toda a propriedade (BRASIL, 2012). Porém, para efeitos de pesquisa, como já desconsideramos as áreas com caatinga preservada, não iremos descontar esses 20% sobre a área disponível calculada.

6.4.2 Avaliação da adequabilidade da área

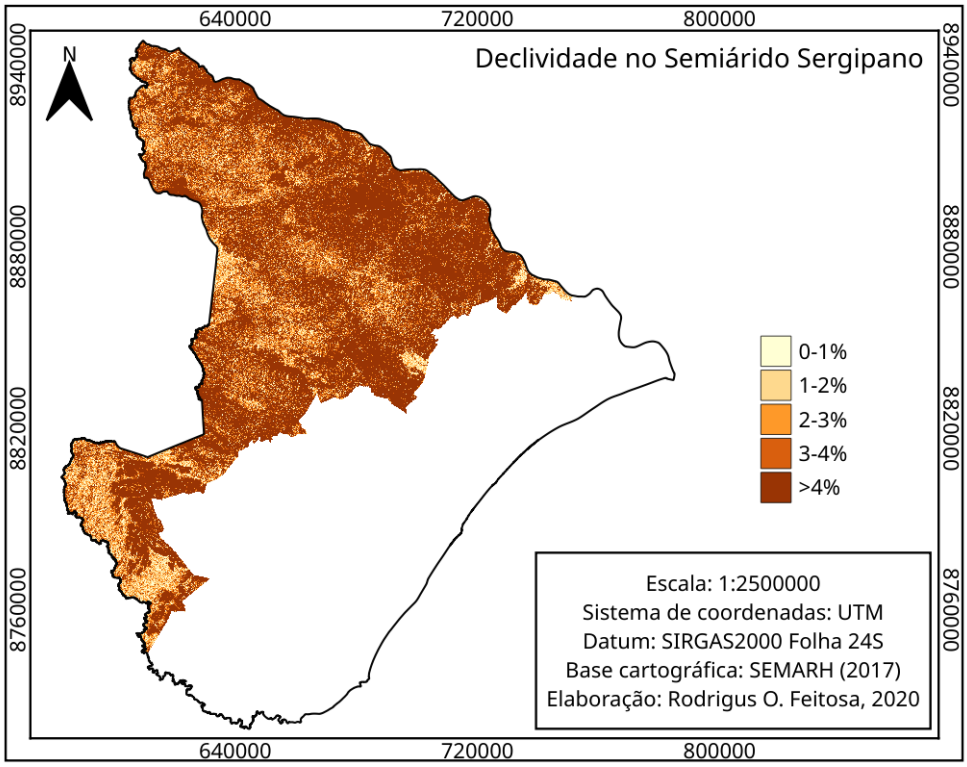
Como resultado do processo de reclassificação e análise de proximidade, produzimos mapas de critérios positivos para radiação global (figura 33), declividade (figura 34), ASD (figura 35), proximidade de linhas de transmissão (figura 36), de vias de transporte (figura 37) e de áreas urbanas (figura 38).

Figura 33: Mapa de radiação global reclassificado



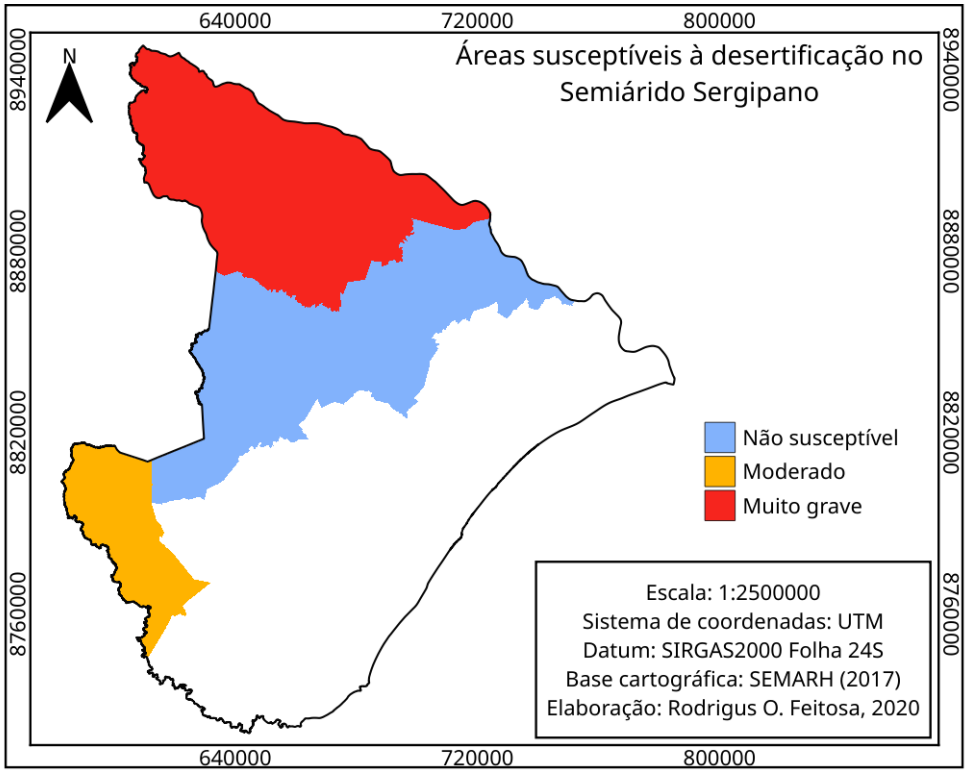
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34: Mapa de declividade reclassificado



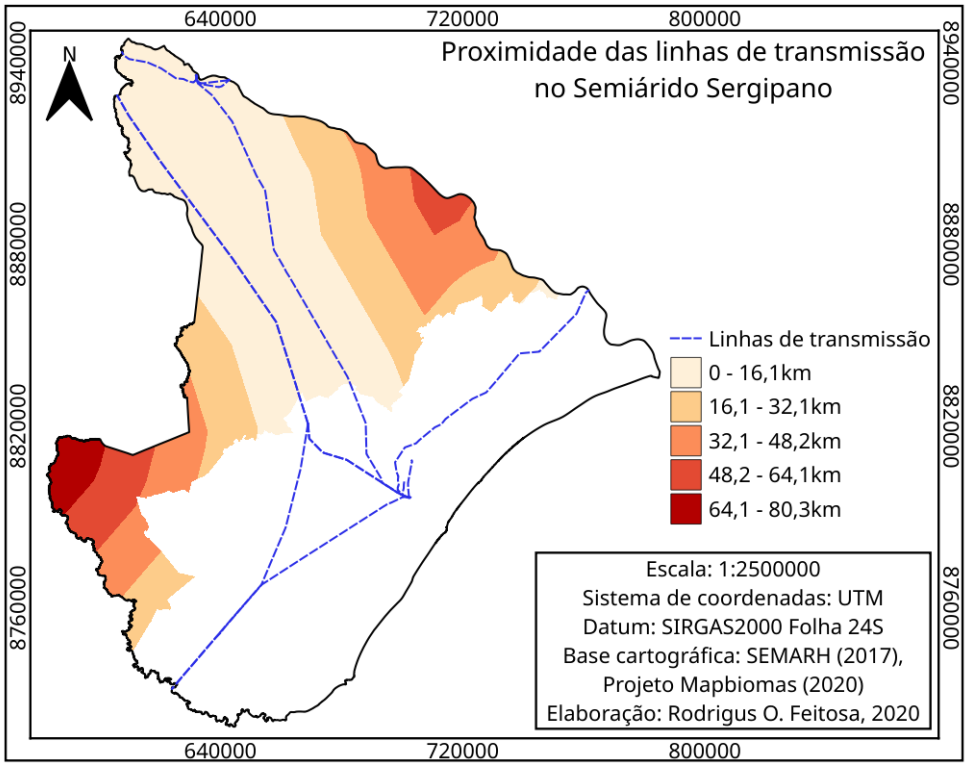
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35: Mapa de ASD



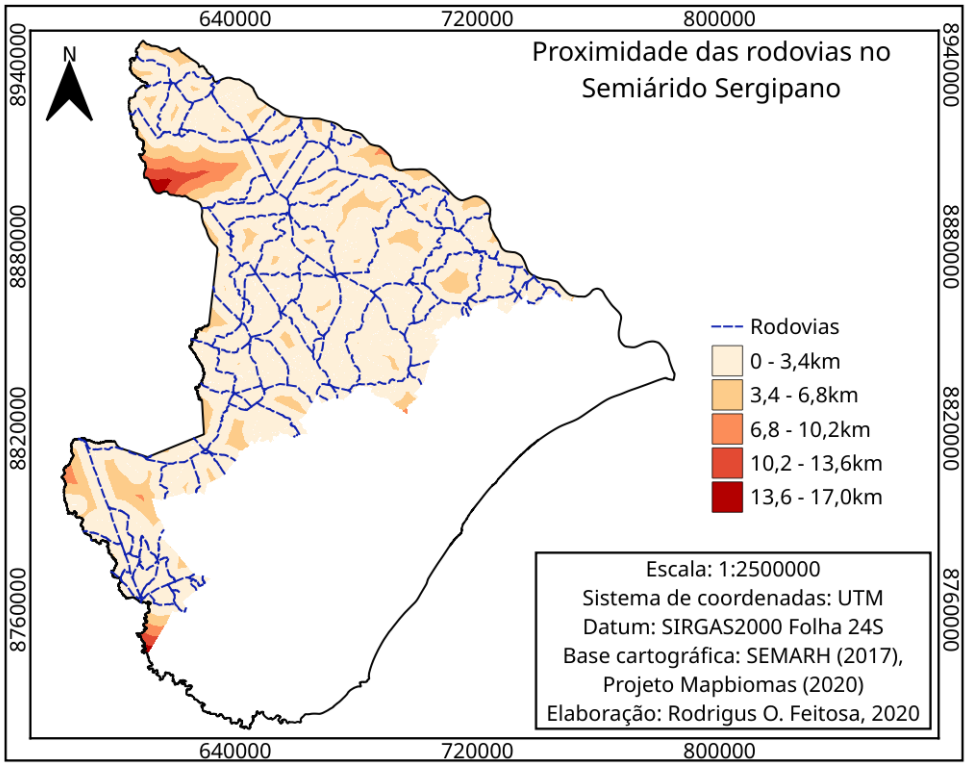
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36: Mapa de proximidade de linhas de transmissão



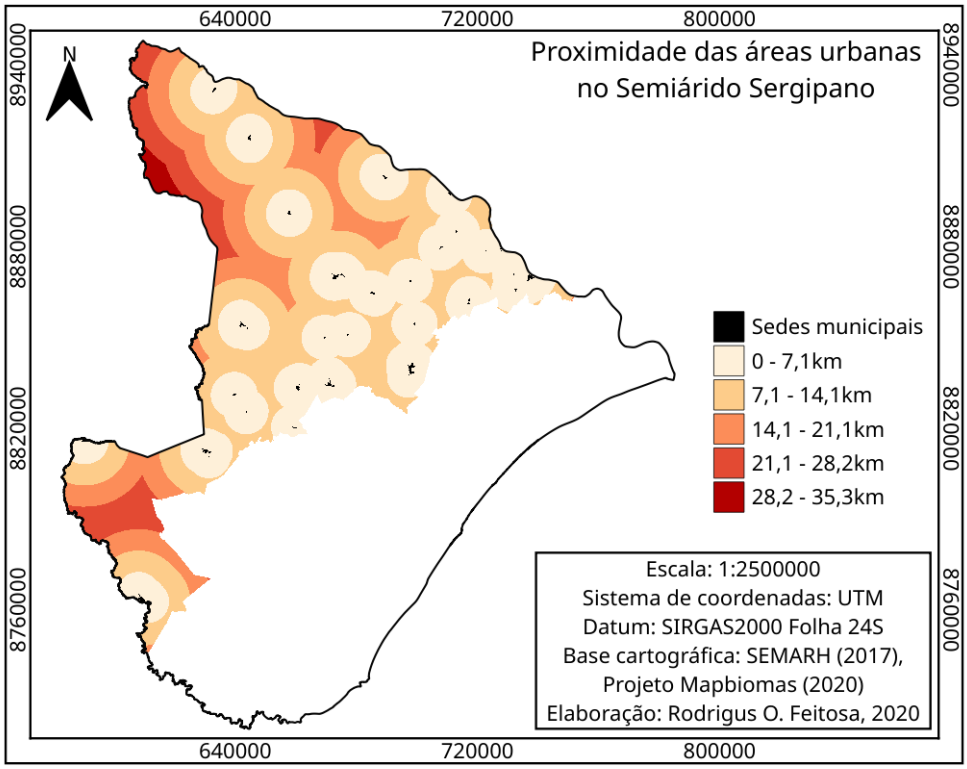
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37: Mapa de proximidade de vias de transporte



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38: Mapa de proximidade de áreas urbanas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a reclassificação, estabelecemos a hierarquia dos critérios positivos, e então, utilizando uma ferramenta AHP on-line (GOEPEL, 2018), submetemos os múltiplos critérios, obtendo os valores apresentados na tabela hierárquica de decisões onde cada subcritério recebeu um peso relativo à sua importância na adequabilidade de uma área para a instalação de módulos FV (tabela 5).

Tabela 5: Tabela hierárquica de decisões

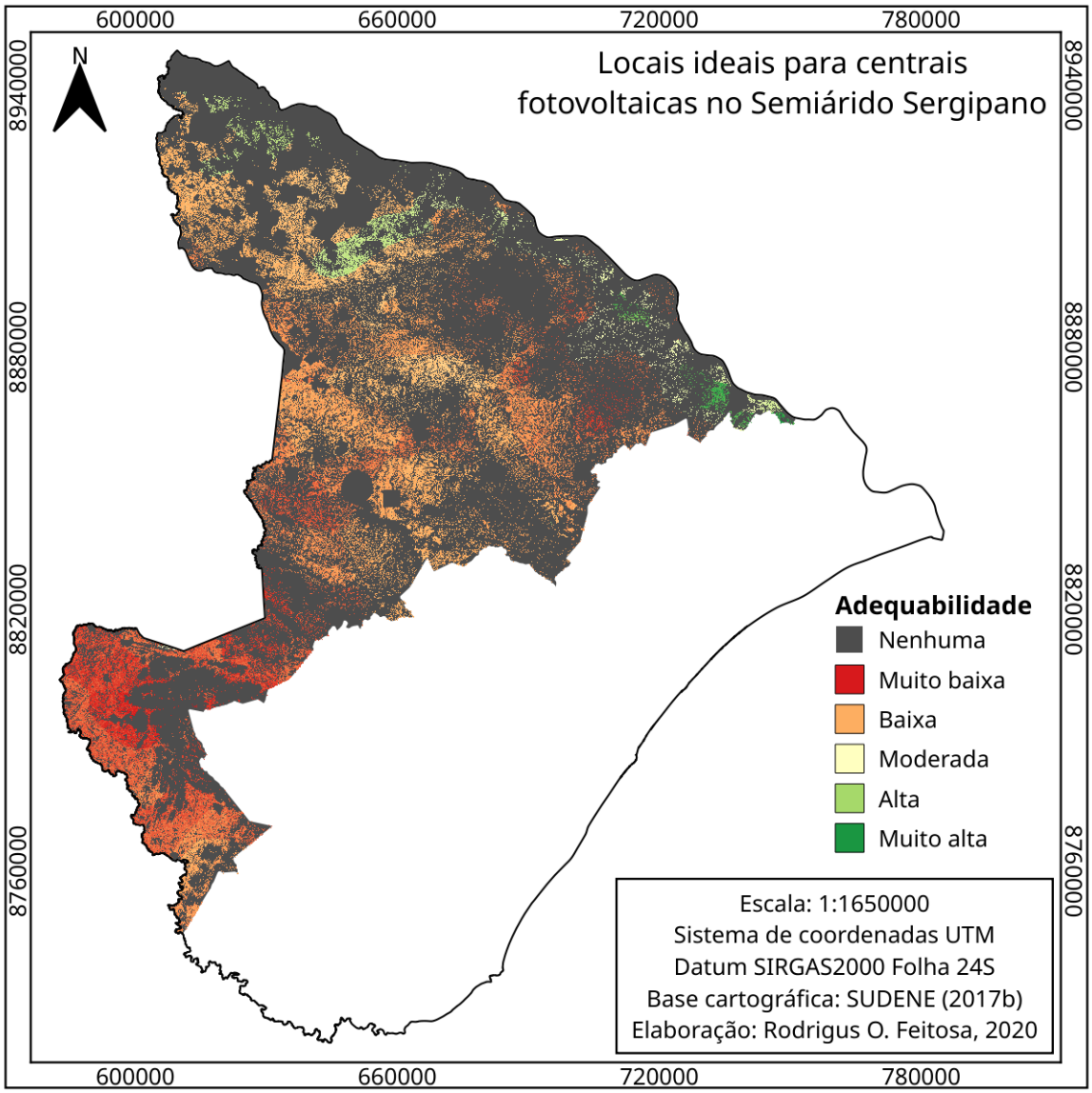
Fator	Critério	Subcritério	Peso
Climático	Radiação global (kWh/m²/dia)	5,16 ⊣ 5,28	0,022
		5,28 ⊣ 5,41	0,034
		5,41 ⊣ 5,53	0,064
		5,53 ⊣ 5,65	0,210
		5,65 – 5,78	0,348
Geomorfológico	Declividade	0 ⊣ 1%	0,038
		1 ⊣ 2%	0,018
		2 ⊣ 3%	0,005
		3 – 4%	0,003
Ambiental	ASD	Muito grave	0,032
		Moderado	0,020
		Não susceptível	0,005
Físico	Linhas de transmissão	0 ⊣ 16,1 km	0,061
		16,1 ⊣ 32,1 km	0,039
		32,1 ⊣ 48,2 km	0,021
		48,2 ⊣ 64,2 km	0,008
		64,2 – 80,3 km	0,005
	Vias de transporte	0 ⊣ 3,4 km	0,006
		3,4 ⊣ 6,8 km	0,004
		68,2 ⊣ 10,2 km	0,002
		10,2 ⊣ 13,6 km	0,001
		13,6 – 17,0 km	0,001
	Área urbana	0 ⊣ 7,1 km	0,024
		7,1 ⊣ 14,1 km	0,015
		14,1 ⊣ 21,2 km	0,009
		21,2 ⊣ 28,2 km	0,003
		28,2 – 35,3 km	0,002
		TOTAL	1,000

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com esses dados geramos novos mapas raster para cada critério positivo onde aos pixels são atribuídos os pesos determinados. A partir desses novos mapas, realizamos a Análise de Sobreposição Ponderada dos múltiplos critérios, utilizada para agregar o peso de cada um, e gerar os dados de adequabilidade.

Os dados resultantes da análise possuem valores entre 0 e 1, onde 0 é nenhuma adequabilidade e 1 muito alta adequabilidade. Cruzamos então os dados de adequabilidade com o mapa de disponibilidade de áreas, e obtivemos como resultado o mapa dos locais ideais para usinas FV, onde cada pixel foi classificado de acordo com sua adequabilidade em: nenhuma, muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta (figura 39).

Figura 39: Mapa dos locais ideais para usinas FV



Fonte: Elaborado pelo autor.

No mapa podemos visualizar que as áreas classificadas com alta e muito alta adequabilidade se localizam ao longo da divisa com o estado de Alagoas, região onde se encontram os maiores valores de radiação global que vai diminuindo à medida que seguimos no sentido sudoeste.

A região mais a noroeste, onde se localizam os municípios de Canindé do São Francisco e Poço Redondo, existe uma grande concentração de assentamentos rurais, consideradas áreas nobres para agricultura, além de duas grandes UC, o Monumento Natural da Grota do Angico e o Monumento Natural do Rio São Francisco, critérios que indisponibilizam grandes áreas para instalação de usinas FV.

6.5 Estimativa do potencial de geração FV

Considerando a quantidade acumulada anual de radiação para o céu claro incidente no semiárido sergipano, e aplicando as equações propostas em nossa metodologia, os resultados obtidos com a álgebra de mapas mostraram um grande potencial solar para a região. Ressaltando que os valores também consideram que 100% das áreas disponíveis estariam utilizadas e que as condições ambientais seriam ideais, o que representa um cenário absolutamente hipotético.

A quantidade de energia solar incidente estimada para todo o semiárido sergipano foi de 29.834,71 Terawatts-hora ao ano (TWh/ano)[1]. Entretanto, como ainda não existe tecnologia capaz de converter 100% dessa energia em eletricidade, a quantidade estimada capaz de ser gerada dentro dos requisitos e considerando as perdas levantadas na pesquisa nas áreas disponíveis, foi de 779,33 TWh/ano (tabela 6). Esse montante de energia seria suficiente para atender 1,62 vezes a demanda de todo o Brasil, de acordo com o consumo total medido no ano de 2019 (MME-EPE, 2020a).

Tabela 6: Potencial de geração FV no semiárido sergipano - TWh/ano.

	Na área total	Na área disponível
Potencial geográfico	29.834,71	7.930,76
Potencial técnico nominal	3.909,01	1.039,11
Potencial técnico de saída	2.931,76	779,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Contabilizando as perdas de eficiência na fotoconversão e dos materiais que compõem o sistema FV, e das variações físicas e restrições locais, obtemos que o potencial técnico de saída aproveitável é de apenas 2,61% de toda energia incidente na área estudada, ainda assim representa uma capacidade elétrica de quase 89 GW.

Elaboramos a tabela 7 com as estimativas de potenciais para cada município inserido na área estudada. Nessa classificação, temos que o município de Tobias Barreto é o que possui maior potencial técnico de saída, 122,50 TWh/ano. Apesar de se localizar na região mais a sul do semiárido sergipano, é um município com grande extensão territorial e, consequentemente, o que tem maior área disponível, 449,24 km^2.

No extremo oposto está o município de Amparo de São Francisco, localizado ao norte do estado, às margens do Rio São Francisco, com 1,96 km^2 de área disponível, mas ainda assim com um potencial de gerar 0,54 TWh/ano.

Os municípios de Poço Redondo e Canindé do São Francisco também possuem grande extensão territorial se comparado aos demais, porém tem sua área disponível reduzida principalmente pela quantidade de assentamentos rurais ali instalados, ainda assim estão classificados entre os 6 maiores potenciais solares da área estudada.

[1] 1 Terawatt = 1.000 Gigawatts = 1.000.000 Megawatts

Tabela 7: Potencial FV por município do semiárido sergipano - TWh/ano

Município	Potencial		
	Geográfico	Nominal	de Saída
Tobias Barreto	1246,56	163,33	122,50
Poço Redondo	788,21	103,27	77,46
Carira	785,77	102,95	77,21
Nossa Senhora da Glória	622,90	81,61	61,21
Poço Verde	606,34	79,44	59,58
Canindé de São Francisco	511,86	67,06	50,30
Simão Dias	402,90	52,79	39,59
Nossa Senhora Aparecida	398,78	52,25	39,19
Porto da Folha	362,21	47,46	35,59
Frei Paulo	281,77	36,92	27,69
Monte Alegre de Sergipe	265,81	34,83	26,12
Feira Nova	220,51	28,89	21,67
Nossa Senhora das Dores	199,92	26,19	19,65
Graccho Cardoso	173,73	22,76	17,07
Ribeirópolis	164,11	21,50	16,13
Gararu	154,55	20,25	15,19
Aquidabã	130,14	17,05	12,79
Cumbe	106,72	13,98	10,49
Pinhão	94,21	12,34	9,26
Propriá	79,00	10,35	7,76
Pedra Mole	65,15	8,54	6,40
Itabi	52,44	6,87	5,15
Macambira	52,18	6,84	5,13
Canhoba	44,63	5,85	4,39
São Miguel do Aleixo	44,40	5,82	4,36
Cedro de São João	25,48	3,34	2,50
Nossa Senhora de Lourdes	23,37	3,06	2,30
Telha	21,63	2,83	2,13
Amparo do São Francisco	5,46	0,72	0,54

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar das perdas e restrições inerentes à instalação de sistemas FV na área estudada, se fosse possível aproveitar somente 0,5% do potencial de saída estimado, isso ainda seria suficiente para atender toda a demanda elétrica do Estado de Sergipe, de acordo com os dados da EPE (2020a).

6.6 Avaliação dos impactos da nova fonte de energia

Os valores estimados do potencial energético solar para sistemas FV instalados no semiárido sergipano consideraram a radiação a partir de um modelo solar para céu claro no período de um ano, o que representa uma situação com baixa probabilidade de ocorrer em virtude das variações atmosféricas de difícil previsibilidade, porém, considerando o

aproveitamento de uma pequena fração desse potencial estimado, os impactos gerados ainda seriam bastante significativos.

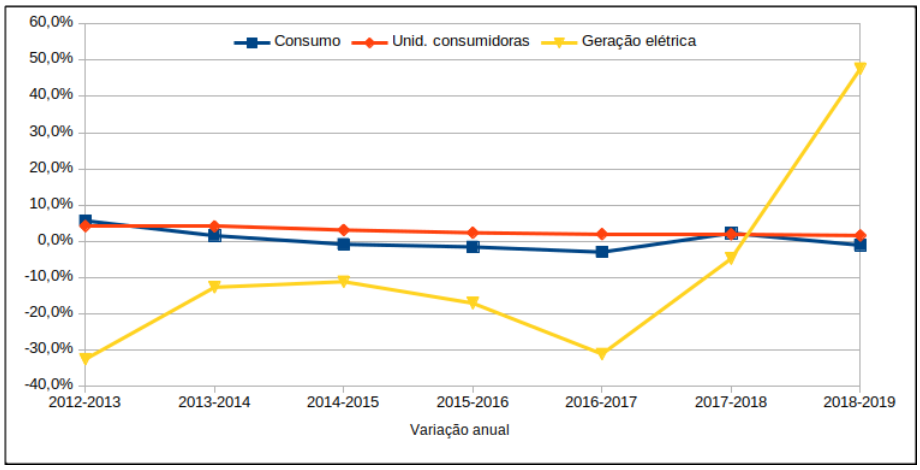
Portanto, para essa análise, iremos considerar um cenário em que a implantação de empreendimentos FV aproveitariam apenas 0,5% desse potencial estimado. Desta forma, qualquer outra porcentagem poderá ser aplicada pra análises futuras. Assim, considerando que o potencial de geração FV estimada para todas as áreas disponíveis no semiárido sergipano foi de 779.328 GWh/ano, em nosso cenário hipotético, o potencial aproveitado de geração elétrica seria de 3.897 GWh/ano.

6.6.1 Impactos energéticos

Analisando o histórico elétrico em Sergipe, elaboramos um gráfico que correlaciona a diferença relativa entre consumo, quantidade de unidades consumidoras e geração elétrica no estado de Sergipe no período de 2012 a 2019 (figura 40). A partir dele, pudemos observar que apesar de o crescimento de unidades consumidoras ter se mantido estável ao longo do período, o consumo elétrico decresceu, com um súbito aumento no intervalo entre os anos de 2017-2018.

Em relação à geração elétrica, entre 2012 e 2018 houve um decréscimo anual recorrente, até que no ano de 2019 quase que dobrou o montante de energia gerada em relação ao ano anterior, ainda que não tenha havido incremento na capacidade geradora nem um aumento no consumo dentro do estado, o que, além de tornar Sergipe autossuficiente, proporcionou a exportação desse saldo positivo de 481 GWh, ao injetá-lo no sistema elétrico nacional.

Figura 40: Consumo x unid. consumidoras x geração elétrica em Sergipe.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de MME-EPE (2020a).

Para Sergipe, considerando que no ano de 2019 o total de eletricidade gerada foi de 4.186 GWh, esse incremento de 3.897 GWh da geração FV estimada para o semiárido, representaria um aumento de aproximadamente 93%. Isso garantiria o status de autossu-

ficiência elétrica ao Estado de Sergipe, que se estabeleceria como exportador de energia à nível nacional e, complementarmente à Usina Hidroelétrica de Xingó e ao Parque Eólico da Barra dos Coqueiros, proporcionaria a total independência de fontes poluentes e não renováveis para geração elétrica no estado, mitigando a necessidade de ativação da Usina Termoelétrica Porto de Sergipe I[2].

Esses 3.897 GWh das usinas FV no semiárido sergipano representaria um aumento de 58,6% na quantidade de energia de fonte solar gerada em todo o país, que no ano de 2019 foi de 6.651 GWh produzida por 52 empreendimentos instalados principalmente na região Nordeste.

Isso significa que o aproveitamento de apenas 0,5% do potencial FV do semiárido sergipano seria equivalente a quase uma hidroelétrica de Xingó em termos de energia gerada, considerando que esta unidade tem a maior capacidade de geração de todas as 12 hidroelétricas operadas pela CHESF, e é a sétima maior do Brasil (CHESF, 2021; EPE, 2020).

O PNE 2050 foi o primeiro relatório da EPE a considerar a fonte solar como uma alternativa para suprir a demanda de expansão da oferta de energia no Brasil. E, diante das incertezas causadas pela pandemia do COVID-19, será necessário reavaliar o cenário futuro no tocante ao desenvolvimento econômico e, consequentemente, ao desenvolvimento energético, que exigirá um novo planejamento e uma injeção robusta de incentivos para recolocar a sociedade brasileira num rumo de prosperidade.

Segundo o PNE 2050, o potencial hidroelétrico inventariado e que ainda não está sendo aproveitado é estimado em 68 GW, correspondente a 38% do potencial máximo existente no Brasil. Sendo que 64% desse potencial não aproveitado se encontra na Região Amazônica, onde existem grandes extensões de áreas protegidas, tais como: terras indígenas, UC e comunidades quilombolas (MME-EPE, 2018b). Isso significa que impacto ambiental dessas hidroelétricas podem estar além dos benefícios que podem oferecer, ainda que seja uma fonte limpa e renovável.

Esse cenário demanda ainda mais urgência no estudo e implantação de outras fontes renováveis com menos impactos, a exemplo da fonte solar nas regiões semiáridas brasileiras.

6.6.2 Impactos ambientais

No Brasil, entre os anos de 2018-2019 houve um incremento de 92,1% na geração elétrica FV, ao passo que a geração termoelétrica a partir de óleos derivados do petróleo teve uma redução de 23,8%. Foi o maior incremento de uma fonte energética específica

[2] Como a Usina Termoelétrica Porto de Sergipe I só recebeu autorização para início das operações em março de 2020 de forma parcial, ainda não existem dados consolidados de geração elétrica (CELSE, 2021).

entre os anos de 2012 a 2019 (MME-EPE, 2020a). O trabalho de CARVALHO e DELGADO (2017) já havia identificado essa tendência de redução da geração termoelétrica pela implementação de centrais FV no Brasil desde 2015, o que contribuiu para que o Brasil diminuísse suas emissões de GEE.

Primeiramente organizamos os dados disponibilizados pela MME-EPE (2020a) na tabela 8, e calculamos o fator de emissão de GEE de cada fonte por ano, relacionando a quantidade de CO_2e emitido por GWh de energia gerada. Ressaltamos que somente utilizamos dados de emissões das fontes termoelétricas que fazem parte do sistema de transmissão integrado do país que são contabilizadas pela EPE.

Tabela 8: Geração elétrica e emissões de GEE do setor elétrico brasileiro

Fonte	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Geração elétrica - GWh								
Gás natural	46.679	68.942	81.073	79.503	56.550	65.591	54.295	60.188
Der. petróleo	16.293	22.223	31.529	25.708	12.207	12.911	10.293	7.846
Carvão	8.422	14.801	18.385	19.096	17.001	16.257	14.204	15.327
Emissões de GEE - Milhões de toneladas CO_2e								
Gás natural	15,1	26,1	31,5	30,5	20,3	24,2	18,9	20,7
Der. petróleo	5,2	11,1	20,3	18,5	7,7	5,1	2,9	1,0
Carvão	8,6	15,7	19,3	19,9	17,4	13,9	11,9	13,0
Fator de emissão - toneladas CO_2e/GWh								
Gás natural	324,13	378,29	387,92	383,88	358,98	369,26	348,10	344,09
Der. petróleo	321,61	498,13	642,90	721,58	630,77	392,69	278,84	124,90
Carvão	1018,75	1059,35	1048,66	1041,55	1020,50	851,96	838,47	848,82

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de MME-EPE (2020a).

A partir desses dados, calculamos a média do fator de emissão de GEE dessas fontes no período de 2012 a 2019 (tabela 9).

Tabela 9: Fator de emissão médio por fonte - toneladas CO_2e/GWh

Fonte	Fator de emissão médio
Gás natural	361,83
Derivados de petróleo	451,43
Carvão	966,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, considerando que a fonte FV não emite GEE em seu processo de geração elétrica, e a energia produzida num cenário de aproveitamento de 0,5% do potencial estimado em nossa pesquisa para o semiárido sergipano seria de 3.897 GWh/ano, a quantidade projetada de CO_2e que cada fonte termoelétrica emitiria na geração desse mesmo montante de eletricidade é bastante significativa como podemos ver na tabela 10.

Tabela 10: Emissão de GEE por fonte - Milhões de toneladas CO_2e

Fonte	Emissão anual para 3.897 GWh
Gás natural	1,41
Derivados de petróleo	1,76
Carvão	3,76

Fonte: Elaborado pelo autor.

O impacto ambiental positivo da geração elétrica FV para a região e todo país é extremamente relevante, especialmente com a recente entrada em operação da nova Usina Termoelétrica Porto de Sergipe I, que é a maior usina deste tipo na América Latina e que, em sua capacidade máxima de 1,5 GW, poderá estar lançando até 561,20 toneladas de CO_2e por hora na atmosfera.

Além das emissões de GEE que pode-se evitar com a energia FV em relação às demais fontes, ela também contribui para o meio ambiente ao não necessitar de transporte de combustível, na redução dos riscos de acidentes em sua operação e, especialmente em regiões semiáridas sob risco de desertificação, não causando grandes perturbações no equilíbrio ecológico e social como ocorre pela formação dos lagos para as hidroelétricas.

Porém, é importante ressaltar que o processo de extração da matéria prima e a fabricação das células FV são bastante prejudiciais ao ambiente devido ao uso de gases tóxicos inflamáveis e metais pesados (CARVALHO; DELGADO, 2017; MME-EPE, 2018b). Também não existem dados suficientes para avaliar os impactos ambientais relativos à disposição dos sistemas no final de sua vida útil. Entretanto, comparando os impactos causados pela tecnologia FV com as outras fontes, e a possibilidade de reciclagem de seus componentes, podemos afirmar que as restrições ambientais não limitam o aproveitamento de seu potencial.

Ainda que o impacto ambiental da energia FV seja bastante significativo diante da energia oriunda do consumo de combustíveis fósseis, ainda acreditamos não ser possível considerar a substituição maciça das termoelétricas por usinas FV, uma vez que a variabilidade diária e sazonal da radiação solar a classifica como uma fonte geradora intermitente, o que nos obriga a utilizar uma outra fonte complementar que nem sempre poderá ser a hidroelétrica.

6.6.3 Impactos socioeconômicos

O que observamos nos dados de estudos examinados foi que a geração FV centralizada não produz os mesmos impactos sociais diretos que a geração distribuída, devido a sua característica centralizada, em que o empreendimento geralmente é implementado e operado por entidades privadas.

Em relação ao primeiro ponto investigado, as oportunidades de empregos, os trabalhos encontrados se referem especificamente à empregos gerados pelo mercado de energia solar no modelo distribuído, onde existe uma profusão de empresas instaladoras de sistemas FV voltados ao setor comercial e residencial, que é um mercado bastante capilarizado com grande demanda de mão-de-obra..

Entretanto, quando se refere ao modelo de geração FV centralizado, poucas empresas possuem a capacidade financeira e técnica para participar dos leilões públicos, para os quais existe um único cliente - o Governo Federal. Neste modelo, a mão-de-obra empregada é intensa na fase de instalação, porém na fase de operação e manutenção é bastante reduzida.

Até junho de 2020 existiam no Brasil 477.137 unidades consumidoras com geração FV distribuídas registradas pela ANEEL, com uma potência instalada que somava 5.553,05 MW (ANEEL, 2020b), enquanto que entre 2014 e 2019 foram contratadas via leilão público 160 usinas FV de geração centralizada, e haviam mais 15 em construção em 2020, que acumulariam uma potência total de 2.993,43 MW (MME-EPE, 2020a; MME-EPE, 2020b).

Diante dos trabalhos analisados que relacionam oportunidades de empregos e energia solar, não foi possível encontrar uma equação que relacione o modelo de geração FV centralizada e quantidade de vagas de emprego direto ou indireto. Porém, é unânime entre os autores estudados que o ponto principal quanto à melhoria do bem-estar social advindo do aproveitamento da energia solar está atrelado à existência de toda uma cadeia produtiva (RODRIGUES *et al.*, 2018; CARSTENS; CUNHA, 2019; HEIDEIER *et al.*, 2020).

Essa cadeia precisa envolver a implantação de indústrias de extração da matéria-prima, de beneficiamento, de manufatura dos componentes, e então as empresas para projetar, comercializar, instalar e manter os sistemas FV. Isso demandaria uma mão-de-obra especializada, o que, consequentemente, estimularia a educação técnica e especializada que aprimoraria os indicadores educacionais da população. Neste cenário, a energia solar centralizada se tornaria um importante fator de melhoria do bem-estar socioeconômico para a região.

No ano 2015 o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) aprovou um financiamento na ordem de R$ 26 milhões para instalação de uma fábrica de módulos fotovoltaicos, a Pure Energy, no município de Marechal Deodoro, no estado de Alagoas, a qual fora inaugurada em 2017. Porém, poucos anos após a inauguração, sem produzir absolutamente nada, a quebra de contrato com o banco de fomento obrigou a indústria a encerrar as atividades (Jornal Extra de Alagoas, 2020).

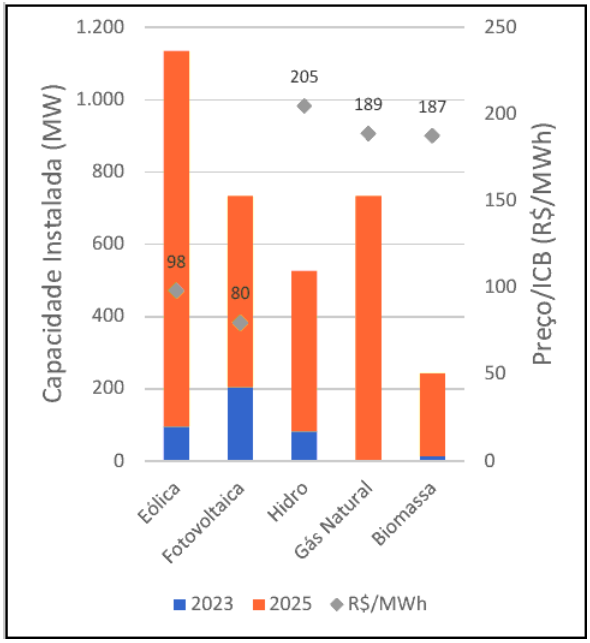
Assim, a instalação de um sistema para a produção de energia precisa estar

vinculada a uma cadeia produtiva sólida, de maneira que a comunidade crie meios de manter o sistema em funcionamento e não dependa de programas assistenciais.

Quanto à tarifação da energia elétrica, segundo dados do Anuário da EPE de 2020, a tarifa média no Nordeste em 2019 foi de R$ 478,17/MWh e o consumo médio por unidade consumidora no mesmo ano foi de 125,2 kWh/mês. E em Sergipe, o consumo anual per capita em 2019 foi de 1.612 kWh/hab (MME-EPE, 2020a).

Nos últimos leilões de energia ocorridos em 2019, o preço-teto estabelecido para a energia FV ficou entre R$ 209,00 e R$ 280,09 por MWh, sendo que o preço médio após o leilão caiu para R$ 80,00/MWh. Essa foi a primeira vez desde o início dos leilões públicos de energia que esse valor ficou abaixo do preço da energia eólica e foi o menor entre todas as fontes leiloadas (figura 41) (MME-EPE, 2020b).

Figura 41: Resultados leilões de energia em 2019



Fonte: MME-EPE (2020b).

Atualmente só existem subsídios para a importação e aquisição de equipamentos FV, o que vem se refletindo na diminuição dos custos de geração, como pode-se constatar pelos resultados dos últimos leilões de energia. Porém, não encontramos resoluções ou sequer projeto de lei que referencie a concessão de qualquer tipo de subsídio para a geração centralizada de energia solar. Pesquisamos ainda projetos de tarifação especial para energia renovável, mas nenhum dado foi encontrado.

As pesquisas foram realizadas nos sites do Governo e Parlamento Brasileiro, das agências de pesquisa e reguladora, e nas bases de periódicos da CAPES e Google Scholar, utilizando combinações dos termos, em português e inglês: "tarifa | tarifação | subsídio"+ "energia"+ "renovável | solar | fotovoltaica".

Até existe um modelo de tarifação especial para os consumidores que geram energia no modelo distribuído, onde seu excedente é injetado na rede pública e o crédito é debitado de sua conta de energia, entretanto, isso não se aplica à geração centralizada, especialmente à parte consumidora.

Um dos fatores que influenciou diretamente essa redução do custo da energia FV no Brasil é atribuído não só aos subsídios na importação e aquisição dos componentes, mas também às despesas de operação e manutenção. Dados de 2018 da MME-EPE (2018b) mostram que a fonte solar é mais vantajosa frente as demais (Tabela 11).

Tabela 11: Custos da geração elétrica por fonte existente em Sergipe

Fonte	Instalação (US$/kW)	Operação/ Manutenção (R$/kW/ano)	Combustível (R$/MWh)
Hidroelétrica	-x-	50,00	0,00
Eólica	1.600,00	100,00	0,00
Fotovoltaica	1.350,00	20,00	0,00
Gás Natural	1.000,00	270,00	260,00

Fonte: MME-EPE (2018b).

Não listamos o custo de instalação da fonte hidroelétrica porque, segundo o MME-EPE (2018b), é muito difícil chegar a um valor bem definido em virtude da grande variabilidade de fatores que influenciam nos custos, tais como: alterações físicas no local da implantação, licenciamento e compensações ambientais, remoção de povoamentos, tipos de turbinas e equipamentos, etc. É importante ressaltar que, segundo esse mesmo relatório, Sergipe não possui mais potencial para hidroelétricas de grande porte.

Os custos reduzidos da geração FV e seus benefícios ambientais deveriam influir em um modelo de tarifação diferenciado. Porém, a demanda por energia aumenta na medida que a população e a economia crescem, e o que ocorre atualmente no Brasil é a necessidade de acionar termoelétricas para compensar a redução na geração hidroelétrica em virtude dos períodos de estiagem.

Embora a escalabilidade dos sistemas FV seja uma grande vantagem, ainda não é possível substituir totalmente as termoelétricas devido à dependência das horas de sol disponíveis, da sazonalidade da radiação solar e da meteorologia.

Diante de todos os fatores apresentados, entendemos que a fonte solar atua como fonte de energia complementar às hidroelétricas, tal qual a fonte eólica, contribuindo na redução da emissão de poluentes e do preço da energia para os consumidores, agindo como contrapeso às termoelétricas, e só assim impactando na vida das pessoas.

Considerações finais

O Sol é o principal fator das difíceis condições do desenvolvimento socioeconômico na região semiárida brasileira, dificultando a inserção de atividades agrossilvopastoris, que desde o início de nossa colonização foi o motor econômico do país. Isso veio a desencadear o legado dessa vasta região brasileira, que apresenta como consequência baixos índices de desenvolvimento humano.

A tecnologia fotovoltaica tem o potencial de alterar este cenário precário, justamente pelo aproveitamento da energia emanada pelo Sol. Diante dessa perspectiva, questionamos qual seria o potencial solar para geração elétrica pela tecnologia FV no semiárido, e quais os impactos da implementação dessa fonte de energia para a sociedade e o meio ambiente nessa região.

Buscamos respostas para essa questão, porém nos deparamos com uma grande lacuna de informações e de estudos científicos. Pouquíssimos trabalhos nessa linha foram encontrados no Brasil, e praticamente nada realizado na região semiárida. Boa parte dos trabalhos eram voltados para a geração de energia solar no modelo distribuído e em áreas urbanas. O único trabalho que abarca todo o semiárido, o ABES (PEREIRA *et al.*, 2017), possui uma resolução espacial muito baixa, o que, para projetos de aproveitamento da radiação solar para geração elétrica, é insuficiente. Era necessário uma análise em escala regional ou local. Uma análise nesse nível requer uma combinação de base de dados dos recursos solares regionais e a análise das condições locais que influenciam a disponibilidade de energia solar, e essa base de dados não existia.

Diversos trabalhos ao redor do mundo já mostravam ser possível empregar recursos da geoinformática para estimar o potencial de geração de energia solar em escala regional, mas sem preocupação em analisar seus impactos para a comunidade local. Assim aventamos a hipótese de que seria possível usar esses recursos tecnológicos para criar uma base de dados sobre potencial solar que pudesse ser replicada para qualquer parte do globo mapeada por satélites, e que essa base fosse capaz de subsidiar projetos públicos ou privados com ênfase na melhoria das condições socioeconômicas da população, especialmente de locais com baixo desenvolvimento humano.

Compreendemos que até se transformar em energia elétrica, a radiação solar sofre influência de diversas variáveis terrestres, desde o topo da atmosfera até a inclinação do terreno. Por isso foi de suma importância entendermos como as características locais interferem na implantação de uma tecnologia ainda tão cara no Brasil como a FV. Apesar de o país ter mais de 60% de sua matriz energética baseada na energia limpa e renovável das hidroelétricas, vimos que nossa capacidade de aproveitamento hídrico está no limite

e que os períodos de escassez hídrica afetam fortemente a geração elétrica brasileira, obrigando o uso caro e poluente de usinas termoelétricas.

Além dos benefícios energéticos e ambientais, a energia solar se mostrou também ser uma potencial fonte aceleradora do desenvolvimento social, até porque a eletricidade em si, mais do que um avanço tecnológico, é direito social. Assim, a busca pelos recursos geoinformáticos e a elaboração de um conjunto de procedimentos que pudessem ser replicados para analisar o aproveitamento do potencial solar, em especial em áreas tão castigadas como o semiárido brasileiro, foi um objetivo mais do que acadêmico, mas social.

Os procedimentos metodológicos aplicados foram definidos a partir de uma compilação de trabalhos realizados em várias localidades no mundo com resultados satisfatórios de acordo com seus objetivos, mas que apresentam algumas lacunas que dificultam sua replicação. Portanto, essa compilação foi necessária porquê não foi encontrada uma metodologia que apresentasse um conjunto de procedimentos detalhados de todo o ciclo da análise da radiação solar na forma que propusemos nesta pesquisa, ou seja, desde a listagem dos parâmetros de entrada na ferramenta de análise solar até a análise do potencial energético fotovoltaico de uma determinada área.

A obtenção de dados primários para validação da pesquisa foi completamente prejudicada pela precariedade da rede e da instrumentação disponível no estado de Sergipe, especialmente porque a análise da radiação solar e da variabilidade sazonal depende primordialmente de sensores em campo para comparação com os resultados gerados pelos modelos solares.

É importante destacarmos mais uma vez que os dados sobre energia elétrica no Brasil empregados na pesquisa são referentes ao ano-base 2019, uma vez que os eventos advindos da pandemia do COVID-19 afetaram os padrões de consumo e, consequentemente, geração elétrica nos anos 2020 e 2021.

Consideramos que os objetivos traçados para a pesquisa foram alcançados. Primeiramente, conseguimos chegar a uma definição e delimitação completa dos parâmetros mínimos necessários para alimentar um SIG com vistas à análise da radiação solar. Identificamos que é de suma importância a busca por dados de sensoriamento remoto o mais recentes possíveis e o cuidado em obtê-los de fontes mundialmente reconhecidas que disponibilizem informações detalhadas sobre seus produtos tecnológicos.

A elaboração de um algoritmo favoreceu o processamento de uma grande quantidade de dados em um reduzido período de tempo, e facilitou a replicação da análise solar para diferentes áreas geográficas, bem como a realização de ajustes nos parâmetros globais de entrada, permitindo inclusive a simulação de diferentes cenários. Essa escalabilidade do algoritmo foi bastante importante no momento em que precisamos ampliar nossa área de estudos inicial.

Mesmo usando recursos gratuitos, foi possível modelar a radiação solar na área estudada para o período de um ano de forma bastante satisfatória ao compararmos com outro mapeamento que empregou profissionais especialistas de diversas áreas e utilizou dados históricos de diversas variáveis. Os dados gerados são bastante significantes e têm a capacidade de subsidiar outras pesquisas e projetos de aproveitamento da radiação solar local com muito boa resolução espacial.

Com a capacidade dos recursos da geoinformática, foi possível cruzar vários outros dados georreferenciados realizando uma análise física da área estudada para identificar os locais com maior potencialidade, e assim tirar o maior proveito possível dos sistemas FV. Os resultados mostraram que as principais restrições para instalação de sistemas FV são APPs e assentamentos agrícolas, porém, as áreas disponíveis ainda são mais que o suficiente para um bom aproveitamento solar.

Por meio da álgebra de mapas foi bastante simples aplicar os cálculos necessários para obtermos o potencial de geração de eletricidade FV nos locais determinados, inclusive em escala local. O potencial encontrado é enorme, apesar de não ter sido possível obter dados confiáveis referentes à nebulosidade, que é o principal fator atmosférico de interferência na geração elétrica FV.

Entre os impactos avaliados, o energético foi o que mais se destacou, pois mostrou que o aproveitamento de uma pequena fração de todo o potencial da área já seria suficiente para, complementarmente à hidroeletricidade, garantir a total autonomia energética de Sergipe, evitando, ao menos pela demanda do estado, a necessidade de acionamento de usinas termoelétricas. Em relação aos impactos ambientais, o principal ponto identificado está relacionado à redução da necessidade das termoelétricas, uma vez que a matriz elétrica estadual é primordialmente limpa. Quanto aos impactos socioeconômicos porém, os resultados da avaliação não foram muito animadores, pois o simples aproveitamento do recurso solar, limpo, renovável e gratuito, não garante benefícios significativos às populações locais, para tanto, seria necessária a implantação de toda uma cadeia produtiva da tecnologia FV, o que ainda não foi possível no Brasil de maneira efetiva.

Portanto, respondendo nosso problema de pesquisa: "qual o potencial solar para geração de energia FV no semiárido sergipano e seus impactos para a sociedade e o meio ambiente?", obtivemos que: o potencial solar para geração FV na área estudada é muito alto e seu aproveitamento não deve ser desperdiçado, mas não haverá benefício socioeconômico efetivo, se não houver a implantação de uma cadeia produtiva para a energia FV na região, ainda que haja um modelo de geração distribuída, esse benefício se resumirá à redução do custo da energia que permitirá apenas um alívio na renda familiar. Os impactos realmente efetivos seriam para o meio ambiente, pela redução da necessidade de acionamento de termoelétricas e, para o setor elétrico, que terá ali uma grande fonte complementar de energia, que compensaria a sazonalidade hídrica que afeta a principal

fonte da matriz energética brasileira, a hidroelétrica.

Para pesquisas futuras, observamos que o uso de novas tecnologias que ofereçam produtos digitais com maior resolução espacial, como a tecnologia LiDAR, permitirá um enorme avanço nas análises de potencial solar, inclusive em ambientes urbanos. Essa tecnologia, por ser empregada em aeronaves, tripuladas ou não, também evita uma variável que causa grande incerteza nas estimativas de radiação, a nebulosidade, uma vez que o veículo usado poderia se deslocar em altitudes abaixo das nuvens. Assim, seria possível a geração de modelos digitais do terreno com altíssima resolução espacial.

Ainda que os resultados da radiação não sejam altamente precisos no tempo e no espaço, a modelagem da radiação e o mapeamento dos locais mais favoráveis à instalação de usinas FV permitem que caros recursos tecnológicos sejam concentrados em áreas menores de forma a coletar dados em campo com maior precisão e assim reduzir as despesas e o tempo dos projetos.

O custo da tecnologia FV vem caindo ao longo do tempo, mas ainda é bastante elevado no Brasil pela necessidade de importação de seus principais componentes, os módulos FV e os inversores. Por isso, o desenvolvimento da energia solar ainda depende, em grande parte, da política energética e dos subsídios financeiros oferecidos pelo governo.

Por fim, com base no que foi apresentado, considerando o potencial estimado nesta pesquisa e os limites conhecidos do potencial hídrico do Brasil, é seguro afirmar que a energia solar deve ocupar um espaço importante na matriz energética nacional no médio e longo prazo. E que o planejamento urbano sustentável é uma fórmula para facilitar o desenvolvimento e adoção da energia solar, tornando as principais ideias de otimização solar pelo desenvolvimento sustentável uma prática comum. Isso só pode ser obtido mediante um planejamento e racionalização do consumo de energia, reduzindo a demanda de forma sustentável.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa Nr 482, de abril de 2012*. Brasília, 2012. Acesso em 13 jul. 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa Nr 687, de novembro de 2015*. Brasília, 2015. Acesso em 31 mai. 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Edital do leilão de geração ANEEL N. 003/2019*. Brasília, 2019. Acesso em 18 jul. 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/geracao4>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. Brasília, 2020. Acesso em 22 fev. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório da Geração Distribuída - versão Junho/2020*. Brasília, 2020. Acesso em 10 mai. 2021. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>.

ALAM, R. Z. *et al.* Solar energy for socio-economic wellbeing in urban areas, malaysia. *International Journal of the Malay World and Civilisation*, v. 4, n. 1, p. 101–107, 2016. ISSN 2289-1706. Acesso em 14 out. 2018. Disponível em: <http://www.ukm.my/jatma-/wp-content/.../IMAN-2016-04SI1-12.pdf>.

ALLEN, R. *et al. SEBAL – Surface Energy Balance Algorithms for Land: advanced training and users manual – version 1.0*. Kimberly, EUA, 2002. Disponível em: <http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>.

ALMEIDA, I. A. C. *Avaliação e comparação do potencial solar e fotovoltaico em zonas urbanas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2013. Acesso em 01 jul. 2018. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/10933/1/Almeida_2013.pdf>.

ALVIM, C. *et al.* Comparação da emissão de gases de efeito estufa (gee) na geração nuclear de eletricidade no brasil com as de outras fontes. *Economia e Energia*, v. 15, n. 79, 2010. Acesso em 08 abr. 2021. Disponível em: <http://ecen.com/eee79/eee79p-/gases_nuclear.htm>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5422: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica*. Rio de Janeiro, 1985. Acesso em 10 fev. 2019. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=9416>.

AZEVÊDO, V. W. B.; CANDEIAS, A. L. B.; TIBA, C. Location study of solar thermal power plant in the state of pernambuco using geoprocessing technologies and

multiple-criteria analysis. *Energies*, v. 10, n. 7, 2017. ISSN 1996-1073. Acesso em 16 abr. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/1042>.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988*. Brasília: [s.n.], 1988.

BRASIL. *Lei Nr 12.651, de 25 de maio de 2012 - Código Florestal*. Brasília: Presidência da República, 2012. Acesso em 25 mai. 2019. Disponível em: <http://www.planalto.gov-.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651compilado.htm>.

BRASIL. *Decreto Nr 7.929, de 18 de fevereiro de 2013*. Brasília, 2013.

BRENNAN, M. *et al.* Effects of spectral albedo on solar photovoltaic devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 124, p. 111–116, 2014. ISSN 0927-0248. Acesso em 17 set. 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/S0927024814000658>.

BROESAMLE, H. *et al.* Assessment of solar electricity potentials in north africa based on satellite data and a geographic information system. *Solar Energy*, v. 70, n. 1, p. 1–12, 2001. ISSN 0038-092X. Acesso em 13 dez.2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X00001262>.

BURROUGH, P. A.; MCDONNEL, R. A. *Principles of geographical information systems*. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1998.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE, 2001. Acesso em 04 mar. 2021. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>.

CARSTENS, D. D. S.; CUNHA, S. K. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in brazil. *Energy Policy*, v. 125, p. 396–404, 2019. ISSN 0301-4215. Acesso em 20 ago.2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com-/science/article/pii/S0301421518307183>.

CARVALHO, M.; DELGADO, D. Potencial da eletricidade solar fotovoltaica para reduzir a pegada de carbono associada a matriz elétrica brasileira. *Revista Latino-americana em Avalaliação do Ciclo de Vida*, Brasília, v. 1, n. 1, p. 64–85, jul/dez. 2017. Acesso em 13 jun. 2020. Disponível em: <http://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/3779>.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SERGIPE S.A. *UTE Porto de Sergipe I*. Aracaju, 2021. Acesso em 15 abr. 2021. Disponível em: <https://celse.com.br/br/ute-porto-de-sergipe-i>.

CHOW, A.; FUNG, A. S.; LI, S. Gis modeling of solar neighborhood potential at a fine spationtemporal resolution. *Revista Buildings*, v. 4, p. 195–206, 2014. Acesso em 11 mai. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings4020195>.

CHRISTELLE, R.; OLIVIER, B.; LUCIEN, W. On the clear sky model of the esra — european solar radiation atlas — with respect to the heliosat method. *Solar Energy*, v. 68, n. 1, p. 33–48, 2000. Acesso em 29 fev. 2020. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X99000559>.

COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. *Sistemas de Geração - Xingó*. Recife, 2021. Acesso em 05 abr. 2021. Disponível em: <https://www.chesf.gov.br-/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Xingo.aspx>.

CRUZ, T. *Análise do potencial de inserção de energia solar térmica para aquecimento de água em residências unifamiliares no Brasil*. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) — COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Acesso em 11 mai. 2018. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/images/publicacoes-/mestrado/Talita_Borges_Cruz.pdf>.

DA SILVA, A. P. N. *et al.* Albedo de superfície estimado a partir de imagens landsat 5-tm no semiárido brasileiro. *Revista de Geografia*, UFPE-DCG/NAPA, Recife, v. 27, n. 1, p. 154–168, jan./mar. 2010. Acesso em 02 out. 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/228802>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DO BRASIL. *Manual de implantação básica de rodovias*. 3. ed. Rio de Janeiro, 2010. Acesso em 17 abr.2019. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/...-/742_manual_de_implantacao_basica.pdf>.

DOMINGUEZ, J.; AMADOR, J. Geographical information systems applied in the fiel os renewable energy sources. *Revista Computers and Industrial Engineering*, v. 52, p. 322–326, 2007. Acesso em 13 mai. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie-.2006.12.008>.

EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO DE SERGIPE. *Estatística agropecuária - Pluviosidade*. Sergipe, 2021. Acesso em 24 fev. 2021. Disponível em: <https://www.emdagro.se.gov.br/pluviosidade/>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017*. Rio de Janeiro, 2018. Acesso em 04 jan. 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019*. Rio de Janeiro, 2020. Acesso em 04 jan. 2021. Disponível em: <https:/-/www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos-/publicacao-479/topico-516/Matriz20ab2019.xlsx>.

EUROPEAN COMMISSION. *Project SoDa - Linke turbidity factor*. Suíça: ParisTech, 2003. Acesso em 13 abr. 2019. Disponível em: <http://www.soda-pro.com/web-services-/atmosphere/linke-turbidity-factor-ozone-water-vapor-and-angstroembeta>.

FERREIRA, A. *et al.* Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 181–191, 2018. ISSN 1364-0321. Acesso em 10 fev. 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect-.com/science/article/pii/S1364032117310389>.

FERREIRA JR., J. J.; DANTAS, M. J. F. Análise do albedo da superfície e índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do rio pacoti/ce. *Revista Tecnologia*, Fortaleza, v. 39, n. 2, out 2018. Acesso em 05 set. 2019. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/8132>.

FRANCISCO, P. *Carta Encíclica "Laudato Si'- Sobre o cuidado da casa comum.* Vaticano: Libreria Editrice Vaticana, 2015. Acesso em 03 mar. 2021. Disponível em: <http://www.vatican.va/content/francesco/pt/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html>.

GABARDO, E. *Interesse Público e Subsidiariedade.* [S.l.]: Editora Fórum, 2009.

GOEPEL, K. Implementation of an online software tool for the analytic hierarchy process (ahp-os). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, v. 10, n. 3, p. 469–487, 2018. Acesso em 04 abr. 2020. Disponível em: <https://bpmsg.com/ahp/ahp.php>.

GONÇALVES, G. R.; POSEIRO, P.; DUARTE, D. Modelação da radiação solar em ambiente urbano: Estudo comparativo entre o solar analyst e o r.sun. In: *Informação geoespacial para as gerações futuras - Oportunidades e desafios.* VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodésia, 2015. Acesso em 28 ago. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication-/289649179_Modelacao_da_Radiacao_Solar_em_Ambiente_Urbano_Estudo_Comparativo_entre_o_Solar_

GOVERNO DO ESTADO DE GOIÁS. *Decreto Nr 8.892, de 17 de fevereiro de 2017.* Goiânia, 2017. Acesso em 04 mar. 2020. Disponível em: <http://www.gabinetecivil.go-.gov.br/pagina_decretos.php?id=16386>.

HEIDEIER, R. *et al.* Impacts of photovoltaic distributed generation and energy efficiency measures on the electricity market of three representative brazilian distribution utilities. *Energy for Sustainable Development*, v. 54, p. 60–71, 2020. Acesso em 26 abr. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/S0973082619302534>.

HOFIERKA, J.; KARNUK, J. Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. *Revista Renewable Energy*, v. 34, p. 2206–2214, 2009. Acesso em 13 jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.021>.

HOFIERKA, J.; ŠÚRI, M. The solar radiation model for open source gis:implementation and applications. *In: Proceedings of the Open source GIS – GRASS Users Conference, Trento, Itália, 2002*, Trento, Itália, 2002. Acesso em 10 jul. 2018. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.19.9831>.

HOFIERKA, J.; ŠÚRI, M.; HULD, T. A. *GRASS GIS 7.7 Reference Manual: r.sun.* [S.l.], 2007. Acesso em 04 abr.2019. Disponível em: <https://grass.osgeo.org/grass77-/manuals/r.sun.html>.

HOFIERKA, J. *et al. GRASS GIS 7.7 Reference Manual: r.horizon.* [S.l.], 2007. Acesso em 15 ago. 2019. Disponível em: <https://grass.osgeo.org/grass77/manuals/r.horizon-.html>.

HOLDERMANN, C.; KISSEL, J.; BEIGEL, J. Distributed photovoltaic generation in brazil: an economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. *Energy Policy*, v. 67, p. 612–617, abr. 2014. Acesso em 12 fev. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/S0301421513011944>.

HULD, T. Pvmaps: Software tools and data for the estimation of solar radiation and photovoltaic module performance over large geographical areas. *Solar Energy*, v. 142, p. 171–181, 2017. ISSN 0038-092X. Acesso em 26 jul. 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16306089>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFA E ESTATÍSTICA. *Resolução IBGE Nr 01, de 24 de fevereiro de 2005*. Brasília, 2005. Acesso em 15 abr.2019. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_normas.shtm?c=14>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFA E ESTATÍSTICA. *IBGE Cidades*. Brasília: IBGE, 2019. Acesso em 17 jun. 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Relatório do Censo Brasileiro de 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA DO BRASIL. *Portaria INMETRO / MDIC Nr 004 de 04 de janeiro de 2011*. Brasília, 2011. Acesso em 02 jun. 2020. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1seq_ato=1652>.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. *Tabela de Eficiência Energética - Sistemas de Energia Fotovoltaica - Módulos*. Brasília, 2017. Atualizada em 2018. Acesso em 01 mar. 2019. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabela_fotovoltaico_modulo.pdf>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Projeto TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil*. São José dos Campos: INPE, 2020. 06 imagens de satélite. Escala 1:250.000. Folhas 09S39, 09S375, 10S39, 10S375, 11S39 e 11S375. Plano de informação de altitude numérica. Acesso em 04 abri. 2020. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>.

JONES, D. L. *et al. Photovoltaics in buildings - BIPV projects*. Londres-GBR: Department of trade and industry, 2000. Acesso em 27 fev. 2019. Disponível em: <https://www.thenbs.com/PublicationIndex/documents/details?Pub=DTI/DocID=251130>.

Jornal Extra de Alagoas (Ed.). *Cerutti tenta passar para frente empresa de energia solar*. Maceió: [s.n.], 2020. Acesso em 04 abr. 2021. Disponível em: <https://novoextra.com.br/sururu/2020/09/659-cerutti-tenta-passar-para-frente-empresa-de-energia-solar>.

LANGE, W. J. *Metodologia de mapeamento da área potencial de telhados de edificações residenciais no Brasil para fins de aproveitamento energético fotovoltaico*. TerraGIS, 2012. Acesso em 18 mar. 2019. Disponível em: <https://energypedia.info/images/4/40-/Metodologia_de_mapeamento_da_Area_potencial_de_telhados_residenciais_para_PV_no_Brasil-.pdf>.

LEONTINA, P. *A Matriz Energética Brasileira: um olhar para o futuro*. 2018. Acesso em 15 dez. 2018. Disponível em: <http://revistamodal.com.br/portal/wp-content/uploads-/2018/10/EstudoEolico.pdf>.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. *Fundamentos de metodologia científica*. 7 ed. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARTINS, F. R. *et al.* Mapas de irradiação solar para o brasil – resultados do projeto swera. *In: Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia – GO*, INPE, Goiânia, p. 3137–3145, 2005. Acesso em 18 jun. 2018. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/eventos/XIISBSR2005/etal.pdf>.

MATSUDA, J. T. M.; PEREIRA, H. M.; SOUZA, L. C. d. O mínimo existencial como limite à aplicação da reserva do possível aos direitos fundamentais sociais. *Revista Virtual da AGU*, Advocacia Geral da União, Brasília, v. 11, n. 116, set 2011. Acesso em 01 jul. 2019. Disponível em: <https://www.agu.gov.br/page/download/index/id/7306306>.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. *Resolução Nr 69, de 16 de julho de 2020*. Brasília, 2020. Acesso em 25 nov. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-69-de-16-de-julho-de-2020-267580785>.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. *Portaria Federal Nr 643, de 13 de novembro de 2017*. Brasília, 2017. Acesso em 13 mar. 2020. Disponível em: <http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19410059/do1-2017-11-14-portaria-n-643-de-13-de-novembro-de-2017-19409958>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Portaria Nr 134, de 28 de março de 2020*. Brasília, 2020. Acesso em 30 nov. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-134-de-28-de-marco-de-2020-250263670>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília, 2007. Acesso em 12 fev. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2030>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2027*. Brasília, 2018. Acesso em 12 jan. 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2027>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília, 2018. Acesso em 12 fev. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Projetos fotovoltaicos nos leilões de energia - Características dos empreendimentos participantes nos leilões de 2013 a 2018*. Brasília, 2018. Acesso em 12 jun. 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br › publicacoes › topico-417 › EPE-DEE-NT-091_2018-r0>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Anuário estatístico de energia elétrica 2020 ano base 2019*. Brasília, 2020. Acesso em 30 nov. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Projetos fotovoltaicos nos leilões de energia – Análises dos leilões de 2019*. Brasília, 2020. Acesso em 10 mai. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/notas-tecnicas-geracao-de-energia>.

MOURA, M. S. B. *et al.* Clima e água de chuva no semi-árido. In: _____. *Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. cap. 2, p. 37–59.

NASCIMENTO, R. L. *Energia solar no Brasil: situação e perspectivas*. Brasília: Câmara dos Deputados, 2017. Acesso em 01 jun. 2019. Disponível em: <http://bd.camara.gov-.br/bd/handle/bdcamara/32259>.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Landsat 8 (L8) data users handbook - version 4.0*. Sioux Falls, South Dakota, EUA, 2019. Acesso em 01 set. 2019. Disponível em: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook>.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Landsat Missions*. Sioux Falls, South Dakota, EUA: United States Geological Survey, 2019. Acesso em 17 set. 2019. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

NGUYEN, H. T.; PEARCE, J. M. Estimating potential photovoltaic yield with r.sun and the open source geographical resources analysis support system. *Solar Energy*, v. 84, n. 5, p. 831–843, mai 2010. Acesso em 15 ago. 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10000812>.

OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software – version 7.4*. EUA, 2018. Acesso em 04 abr. 2019. Disponível em: <https://grass.osgeo.org>.

OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION. *QGIS Geographic Information System - version 3.4 Madeira*. EUA, 2019. Acesso em 04 abr. 2019. Disponível em: <https://docs.qgis.org/3.4/pt_BR/docs/user_manual/>.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. *Resultados da operação - Qualidade do suprimento*. Brasília, 2019. Acesso em 28 fev. 2019. Disponível em: <http://ons.org.br-/paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento>.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. *Meteorologia agrícola*. Piracicaba: ESALQ, 2007.

PEREIRA, E. B. *et al. Atlas brasileiro de energia solar 2017*. 2 ed. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Acesso em 01 jul. 2018. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br-/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf>.

PEREIRA, E. B. *et al. Atlas brasileiro de energia solar 2006*. São José dos Campos: INPE, 2006. Acesso em 01 jul. 2018. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren-/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>.

PIMENTA, L. B. *et al.* Processo analítico hierárquico (ahp) em ambiente sig: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. *Interações (Campo Grande)*, scielo, Campo Grande, v. 20, n. 2, p. 407–420, jun 2019. Acesso em 16 abr. 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttextpid=S1518-70122019000200407nrm=iso>.

PINTOR, B. H. *et al.* Solar energy resource assessment using r.sun in grass gis and site suitability analysis using ahp for groundmounted solar photovoltaic (pv) farm in the central luzon region (region 3), philippines. In: *Free and Open Source Software for Geospatial (FOSS4G) Conference Proceedings*. Seul - Coreia do Sul: [s.n.], 2015. v. 15. Acesso em 28 ago. 2019. Disponível em: <https://scholarworks.umass.edu/foss4g/vol15-/iss1/3>.

PREFEITURA DE PALMAS-TO. *Lei Complementar Nr 327 de 24 de novembro de 2015*. Palmas, 2015. Acesso em 04 mar. 2020. Disponível em: <https://www-.normasbrasil.com.br/norma/lei-complementar-327-2015-palmas_338209.html>.

PROJETO MAPBIOMAS. *Projeto MapBiomas - Coleção 2020 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil*. 2020. Acesso em 01 mar. 2020. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>.

QUAN, S. J. *et al.* A gis-based energy balance modeling system for urban solar buildings. In: *Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015)*. [s.n.], 2015. v. 75, p. 2946–2952. ISSN 1876-6102. Acesso em 16 ago. 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215013661>.

REDWEIK, P.; CATITA, C.; BRITO, M. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Revista Solar Energy*, v. 97, p. 332–341, 2013. Acesso em 18 mai. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036>.

REGINATO, V. Sensoriamento remoto aplicado a identificação de potencial solar em escalas regionais. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v. 1, n. 2, p. 11–28, 2020. Acesso em 03 mar. 2021. Disponível em: <https://rbsr.com.br/index.php/RBSR/article-/view/13>.

Análise de impactos técnico e social da utilização da energia solar fotovoltaica no Distrito Federal. Acesso em 01 abr. 2021. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br-/cbens/article/view/531>.

RUHOOF, A. L.; NOVO, B. B. S.; DA ROCHA, H. R. Determinação da irradiância solar no topo da atmosfera para cálculo do albedo e balanço de energia a partir de imagens landsat 8 oli. In: *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*. João Pessoa: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2015. Acesso em 06 set. 2019. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0883.pdf>.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, v. 48, n. 1, p. 9–26, set. 1990. ISSN 0377-2217. Acesso em 29 abr. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179090057I>.

SÁNCHEZ-LOZANO, J. M. *et al.* Geographical information systems (gis) and multi-criteria decision making (mcdm) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 24, p. 544–556, 2013. ISSN 1364-0321. Acesso em 23 jun. 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113001780>.

SANTOS, C. A. C. *et al.* Obtenção de parâmetros ambientais na região semiárida da paraíba por dados modis. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Scielo, São Paulo, v. 32, p. 633–647, 12 2017. ISSN 0102-7786. Acesso em 13 jun. 2018. Disponível em: <http://www-.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext\pid=S0102-77862017000400633\nrm=iso>.

SANTOS, I. P.; RÜTHER, R. Avaliação das características das coberturas das residências unifamiliares para o aproveitamento da energia solar. ENTAC, Natal, v. 1, 2009. Acesso em 13 jul. 2018. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/encac/files-/2009/ENCAC09_1065_1075.pdf>.

SANTOS, W. M. *et al.* Variabilidade espacial da sazonalidade da chuva no semiárido brasileiro. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, p. 368–376, ago 2017. Disponível em: <http://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/1466>.

SARLET, I. W.; ZOCKUN, C. Z. Notas sobre o mínimo existencial e sua interpretação pelo stf no âmbito do controle judicial das políticas públicas com base nos direitos sociais. *Revista de Investigações Constitucionais*, v. 3, n. 2, p. 115–141, mai/ago 2016. Acesso em 02 jul. 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rinc/article/view/46594>.

SECRETARIA DE ESTADO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO. *Arquivos vetoriais das áreas urbanas do Território do Alto Sertão - Base cartográfica digital de Sergipe*. Aracaju: Observatório de Sergipe, 2010. Acesso em 02 fev. 2019. Disponível em: <http://observatorio.se.gov.br/base-cartografica-de-sergipe/base-cartografica-digital-de-sergipe/>.

SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DE SERGIPE. *Atlas Digital sobre Recursos Hídricos de Sergipe v.10.16*. 2017. Acesso em 17 jul. 2018. Disponível em: <http://www.semarh.se.gov.br/recursoshidricos-/?page_id=486>.

SGARBOSSA, L. F. *Crítica à Teoria dos Custos dos Direitos*. Porto Alegre: S.A. Fabris, 2010. (Reserva do Possível, v. 1).

SHAPIRO, M.; WAUPOTITSCH, O. *GRASS GIS 7.7 Reference Manual: r.slope.aspect*. [S.l.], 2018. Acesso em 15 ago. 2019. Disponível em: <https://grass.osgeo.org/grass77-/manuals/r.slope.aspect.html>.

SHORT, N. M. *The remote sensing tutorial*. Washington D.C., EUA: NASA, 2009. Acesso em 26 jul. 2019. Disponível em: <http://rst.gsfc.nasa.gov/>.

SILVA, C. O. F. de; TEIXEIRA, A. H. C. de; MANZIONE, R. L. agriwater: An r package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data. *Environmental Modelling & Software*, v. 120, p. 104–497, 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article-/pii/S1364815219301306>.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇOES DE GASES DO EFEITO ESTUFA. *Estimativas de emissões de gases de efeito estufa em Sergipe ano-base 2018*. Brasil, 2019. Acesso em 21 abr. 2021. Disponível em: <http://plataforma-.seeg.eco.br/territories/sergipe/card?year=2018>.

SOLARGIS. *Global solar atlas*. Suíça: Solargis, 2019. Acesso em 02 dez. 2019. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/download/brazil>.

SOUZA, A. P. *et al.* Estimativas das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação global horizontal. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, scielo, v. 15, p. 277–288, mar. 2011. ISSN 1415-4366. Acesso em 13 jul. 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo-.php?script=sci_arttext\pid=S1415-43662011000300009\nrm=iso>.

STATKRAFT ENERGIAS RENOVÁVEIS S.A. *Dados Parque Eólico Barra dos Coqueiros*. Florianópolis, 2021. Acesso em 05 abr. 2021. Disponível em: <https://www-.statkraft.com.br/onde-operamos/brasil/parque-eolico-barra-dos-coqueiros/>.

SUN, Y. *et al.* Gis-based approach for potential analysis of solar pv generation at the regional scale: A case study of fujian province. *Energy Policy*, v. 58, p. 248–259, 2013. ISSN 0301-4215. Acesso em 21 abr. 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect-.com/science/article/pii/S0301421513001560>.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. *Resolução SUDENE Nr 107, de 27 de julho de 2017*. Brasília, 2017. Acesso em 15 jun. 2019. Disponível em: <http://sudene.gov.br/images/2017/arquivos/Resolucao-107-2017.pdf>.

ŠÚRI, M. *et al.* Potential os solar electricity generation in the european union member states and candidate countries. *Revista Solar Energy*, v. 81, p. 1295–1305, 2007. Acesso em 12 jun. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii-/S0038092X07000229>.

TEIXEIRA, A. H. C. *et al.* Large-scale water productivity assessments with modis images in a changing semi-arid environment: A brazilian case study. *Remote Sens*, v. 5, p. 5783–5804, 2013. Acesso em 28 fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390-/rs5115783>.

TIBA, C.; REIS, R. J.; SOARES, M. A. S. Estudo de localização de centrais termoelétricas solares de grande porte no estado de minas gerais. *Revista Espinhaço - UFVJM*, p. 49–62, 2014. Acesso em 11 mai. 2018. Disponível em: <http://www-.revistaespinhaco.com/index.php/journal/article/view/62>.

TOMASELLA, J. *et al.* Desertification trends in the northeast of brazil over the period 2000–2016. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 73, p. 197–206, dez. 2018. ISSN 0303-2434. Acesso em 30 jul. 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030324341830607X>.

TRINDADE, E. *Energia solar vira fonte de renda no sertão baiano*. São Paulo: Folha de São Paulo, 2013. Acesso em 06 dez.2018. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com-.br/.../1372709-sol-vira-fonte-de-renda-no-sertao-baiano.shtml>.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ. *Projeto da UFPI instala sistema de bombeamento de água no semiárido piauiense usando energia solar*. Teresina, 2019. Acesso em 24 fev. 2021. Disponível em: <https://ufpi.br/ultimas-noticias-ufpi/32493-projeto-da-ufpi-instala-sistema-de-bombeamento-de-agua-no-semiarido-piauiense-usando-energia-solar>.

WEBER, T. A ideia de um "mínimo existencial"de j. rawls. *Revista Kriterion*, v. 54, n. 127, p. 197–210, jun 2013. Acesso em 02 jul. 2019. Disponível em: <http://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/11584>.

WONG, M. S. *et al.* Estimation of hong kong's solar energy potential using gis and remote sensing technologies. *Renewable Energy*, v. 99, p. 325–335, 2016. ISSN 0960-1481. Acesso em 21 abr. 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article-/pii/S0960148116305997>.

ZHANG, J. *et al. Metrics for evaluating the accuracy of solar power forecasting*. Golden, Colorado, EUA, 2013. Acesso em 20 abr. 2020. Disponível em: <https://www.nrel.gov-/docs/fy14osti/60142.pdf>.

Apêndices

APÊNDICE A – Algoritmo de Automação do Módulo r.sun

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-
'''
Esse trabalho foi elaborado como parte da Tese de Doutorado de Rodrigus
Oliveira Feitosa, aluno do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento
e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe (PRODEMA-UFS), sob
orientação do Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza, e intitulada
SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE
GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO SEMIÁRIDO SERGIPANO.

Autor: RODRIGUS OLIVEIRA FEITOSA
Objetivo: gerar automaticamente os mapas mensais de radiação solar
          diária média (Wh/m2/dia) usando o módulo r.sun (Modo 2) do
          sistema GRASS.
Parâmetros: Rasters mensais do Coeficiente de Turbidez de Linke, rasters
            de Albedo para cada estação, Mapa Digital de Elevação (MDE)
            em metros,raster de orientação, raster de declividade,
            rasters de horizonte (r.horizon), horizon_step igual ao
            usado no r.horizon.
Obs.: 1. Todos os mapas devem ter a mesma resolução do MDE.
      2. Na região semiárida brasileira temos basicamente duas estações
         no ano: chuvosa e seca, e que varia para cada estado
      3. Os procedimentos para obtenção dos parâmetros encontram-se na
         Tese de Doutorado do autor, que pode ser encontrada
         no Repositório Institucional da UFS.

Aviso: O tempo total de processamento pode durar muitas horas ou dias,
a depender da resolução dos mapas, da quantidade de meses processados
e dos recursos computacionais utilizados.
Esse código é livre e gratuito e pode ser usado e alterado desde que
sejam feitas as devidas citações.
'''
```

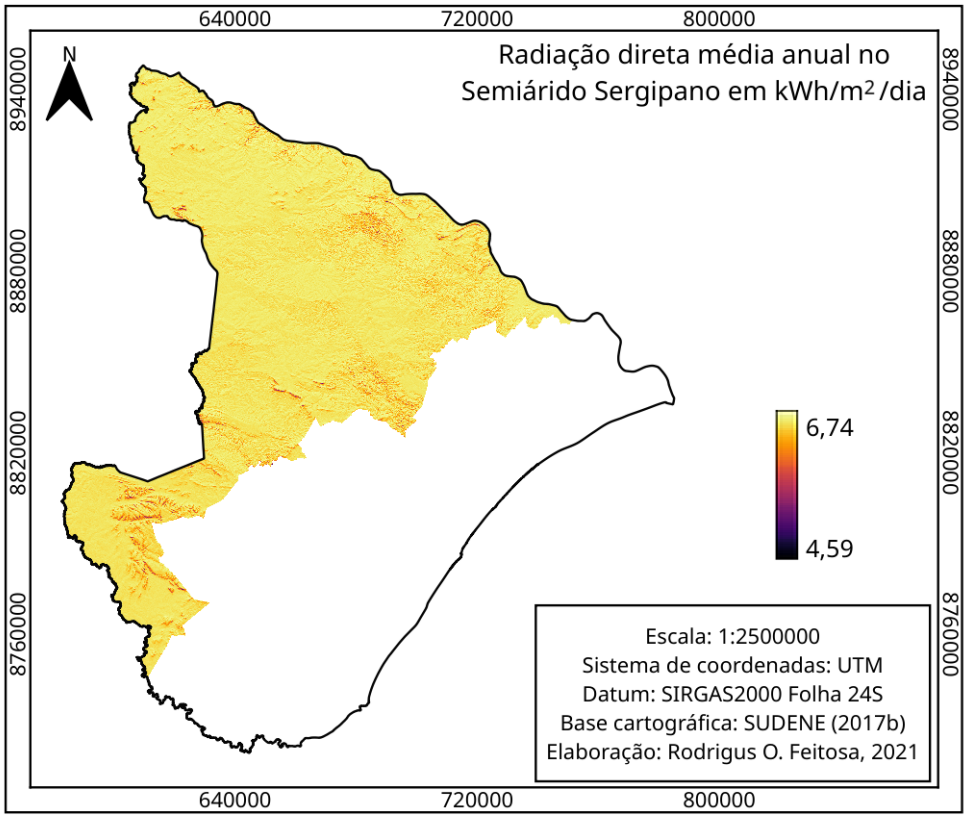
```
# Lista dos Dias Julianos
JAN = range(1,32)
FEV = range(32,60)
MAR = range(60,91)
ABR = range(91,121)
MAI = range(121,152)
JUN = range(152,182)
JUL = range(182,213)
AGO = range(213,244)
SET = range(244,274)
OUT = range(274,305)
NOV = range(305,335)
DEZ = range(335,366)

# Listas de meses
n = range(1)
MESES = [n,JAN,FEV,MAR,ABR,MAI,JUN,JUL,AGO,SET,OUT,NOV,DEZ]
NOME_MES = ['n','janeiro','fevereiro','marco','abril','maio','junho',\
'julho','agosto','setembro','outubro','novembro','dezembro']

# Funcao que gera os mapas de radiacao diária por mês
# Args: numero do mes (1-12)
def mapas(nr_MES):
    radDire_dia = 'radDireta_dia_{}'
    radDifu_dia = 'radDifusa_dia_{}'
    radGlob_dia = 'radGlobal_dia_{}'
    radRefl_dia = 'radRefletida_dia_{}'

    #Mapas de radiacao total mensal (somatorio)
    radDire_SUM_mes = 'radDireta_SUM_' + NOME_MES[nr_MES]
    radDifu_SUM_mes = 'radDifusa_SUM_' + NOME_MES[nr_MES]
    radRefl_SUM_mes = 'radRefletida_SUM_' + NOME_MES[nr_MES]
    radGlob_SUM_mes = 'radGlobal_SUM_' + NOME_MES[nr_MES]

    #Mapas de radiacao média mensal
    radDire_MED_mes = 'radDireta_MED_' + NOME_MES[nr_MES]
    radDifu_MED_mes = 'radDifusa_MED_' + NOME_MES[nr_MES]
    radRefl_MED_mes = 'radRefletida_MED_' + NOME_MES[nr_MES]
    radGlob_MED_mes = 'radGlobal_MED_' + NOME_MES[nr_MES]
```

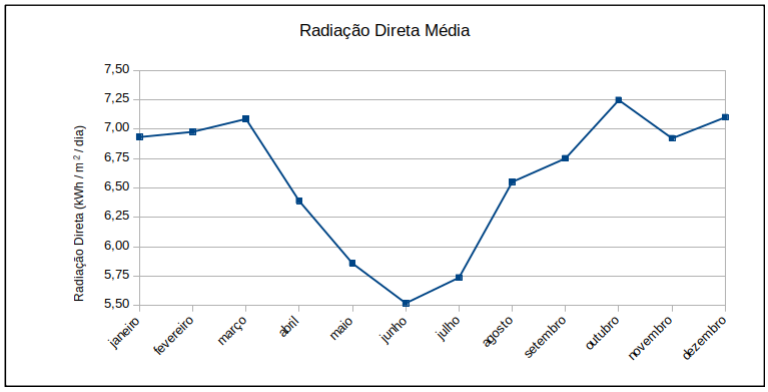
```
#Inicializando mapas mensais
gscript.mapcalc('$soma = 0',soma=radDire_SUM_mes, overwrite=True)
gscript.mapcalc('$soma = 0',soma=radDifu_SUM_mes, overwrite=True)
gscript.mapcalc('$soma = 0',soma=radRefl_SUM_mes, overwrite=True)
gscript.mapcalc('$soma = 0',soma=radGlob_SUM_mes, overwrite=True)

gscript.mapcalc('$soma = 0',soma=radDire_MED_mes, overwrite=True)
gscript.mapcalc('$soma = 0',soma=radDifu_MED_mes, overwrite=True)
gscript.mapcalc('$soma = 0',soma=radRefl_MED_mes, overwrite=True)
gscript.mapcalc('$soma = 0',soma=radGlob_MED_mes, overwrite=True)

print('GERANDO MAPAS DO MÊS DE: ' + NOME_MES[nr_MES])

mapa_TLinke = 'TL_Semiarido_' + NOME_MES[nr_MES] + '@PERMANENT'

try:
    for dia in MESES[nr_MES]:
      print('MAPAS DO DIA JULIANO: ' + str(dia))

      if dia >= 79 and dia <= 264:
          # Gera mapas de radiacao mes CHUVOSO (20/abr-21/set)
          mapa_Albedo = 'albedo24h_SUP_2019_chuvoso@PERMANENT'
      else:
          # Gera mapas de radiacao mes SECO (22/set-19/mar)
          mapa_Albedo = 'albedo24h_SUP_2018_seco@PERMANENT'

      gscript.run_command('r.sun',elevation='mde_semiarido@PERMANENT',
      aspect='orientacao@PERMANENT',slope='declividade@PERMANENT',
      linke=mapa_TLinke, albedo=mapa_Albedo,
      horizon_basename='horizonte', horizon_step='15',
      beam_rad=radDire_dia.format(dia),
      diff_rad=radDifu_dia.format(dia),
      refl_rad=radRefl_dia.format(dia),
      glob_rad=radGlob_dia.format(dia),day=str(dia),nprocs='1000')

      #Calculando os mapas totais mensais
      gscript.mapcalc('$soma = $acum + $dia',soma=radDire_SUM_mes,
      acum=radDire_SUM_mes, dia=radDire_dia.format(dia),
```

```
  overwrite=True)
  gscript.mapcalc('$soma = $acum + $dia',soma=radDifu_SUM_mes,
  acum=radDifu_SUM_mes, dia=radDifu_dia.format(dia),
  overwrite=True)
  gscript.mapcalc('$soma = $acum + $dia',soma=radRefl_SUM_mes,
  acum=radRefl_SUM_mes, dia=radRefl_dia.format(dia),
  overwrite=True)
  gscript.mapcalc('$soma = $acum + $dia',soma=radGlob_SUM_mes,
  acum=radGlob_SUM_mes, dia=radGlob_dia.format(dia),
  overwrite=True)

  #Fim do for

#Apagando os mapas diários
gscript.run_command('g.remove', flags='f', type='raster',
pattern='*_dia_*')

#Calculando os mapas de médias mensais
qtde_dias = len(MESES[nr_MES])

gscript.mapcalc('$media = $soma / $dias',media=radDire_MED_mes,
soma=radDire_SUM_mes, dias=qtde_dias, overwrite=True)
gscript.mapcalc('$media = $soma / $dias',media=radDifu_MED_mes,
soma=radDifu_SUM_mes, dias=qtde_dias, overwrite=True)
gscript.mapcalc('$media = $soma / $dias',media=radRefl_MED_mes,
soma=radRefl_SUM_mes, dias=qtde_dias, overwrite=True)
gscript.mapcalc('$media = $soma / $dias',media=radGlob_MED_mes,
soma=radGlob_SUM_mes, dias=qtde_dias, overwrite=True)

#Colorindo os mapas
# Desta forma (multiplos mapas) a escala de cores usará o menor
# valor Mín e o maior valor Máx entre todos os mapas
param_maps = ""
param_maps = radDire_SUM_mes + "," + radDifu_SUM_mes + "," +
radRefl_SUM_mes + "," + radGlob_SUM_mes
gscript.run_command('r.colors', map=param_maps, col='inferno')

param_maps = radDire_MED_mes + "," + radDifu_MED_mes + "," +
radRefl_MED_mes + "," + radGlob_MED_mes
```

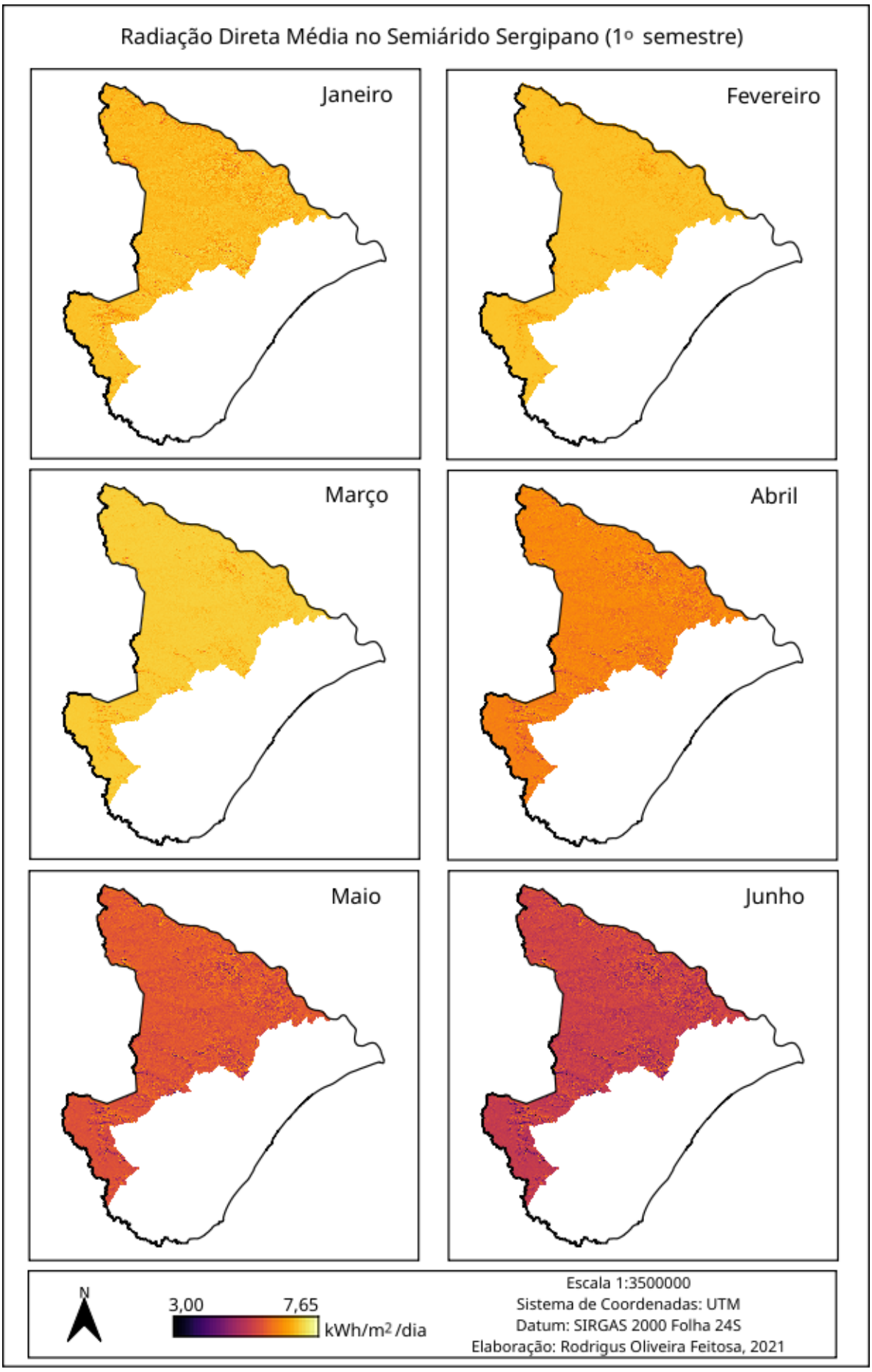
```
        gscript.run_command('r.colors', map=param_maps, col='inferno')

    except CalledModuleError as e:
        gscript.fatal('{0}'.format(e))

def main():
    for mes in range(1,13):
        mapas(mes)

    print('PROCESSO FINALIZADO COM SUCESSO!')
    return 0

if __name__ == '__main__':
    import sys
    import os
    import grass.script as gscript

    sys.exit(main())

# FIM DO ALGORITMO
```

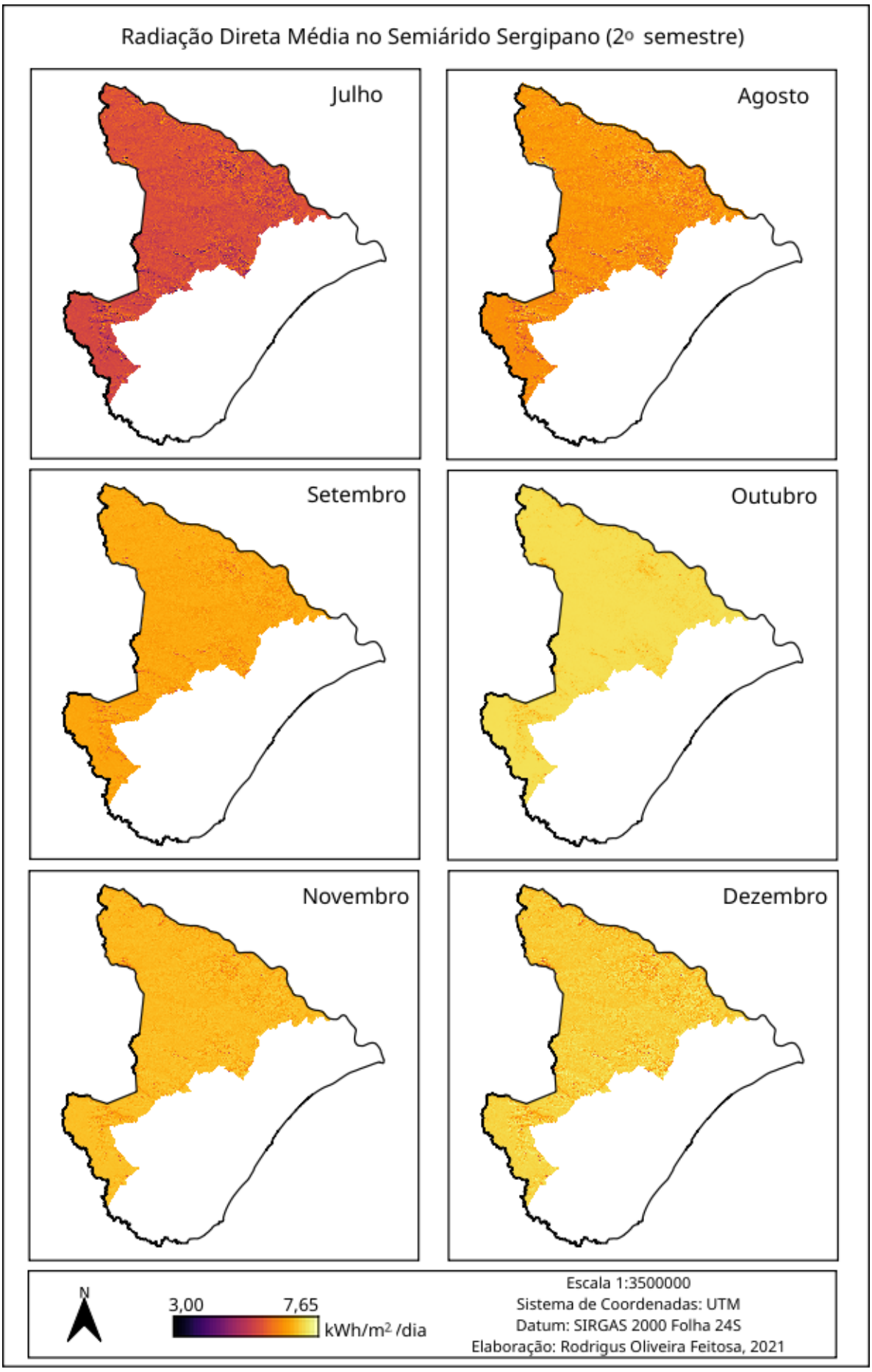
APÊNDICE B – Dados de Radiação Solar Direta para o Céu Claro



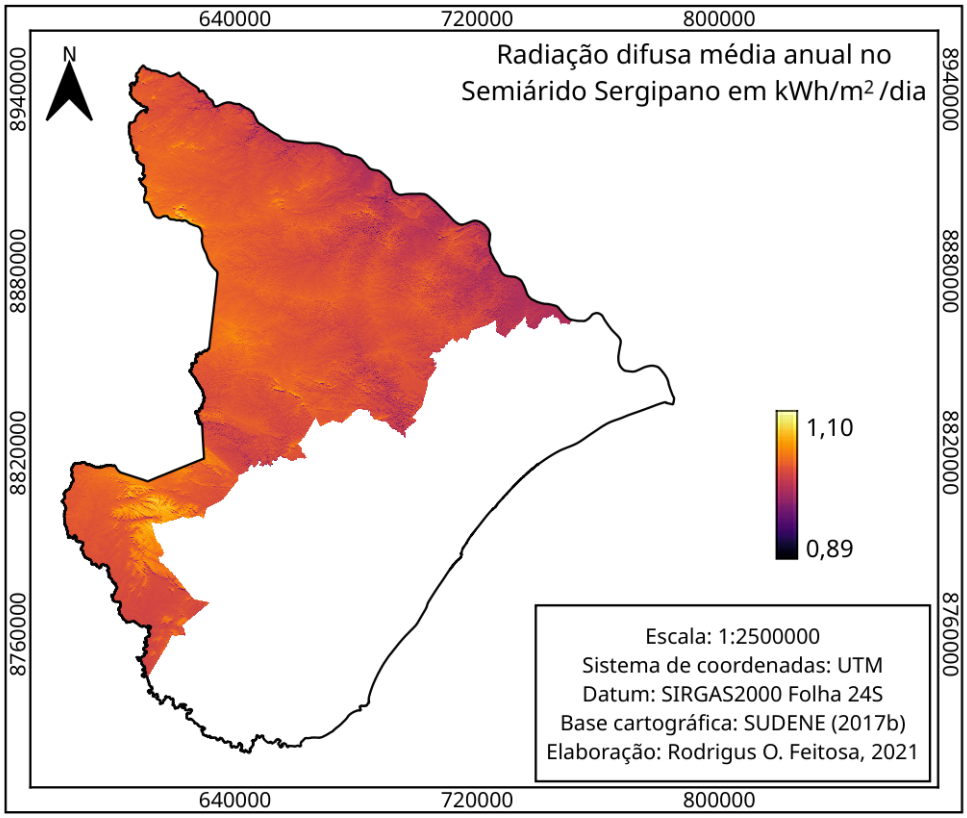


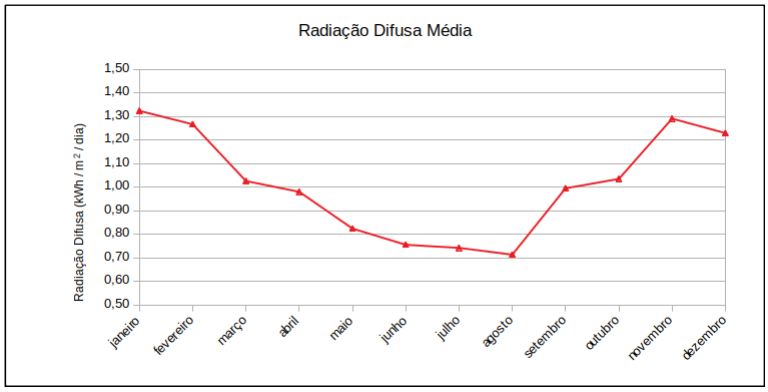
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020


Radiação Direta Média no Semiárido Sergipano (1º semestre)
Janeiro
Fevereiro
Março
Abril
Maio
Junho
N
3,00
7,65
kWh/m² /dia
Escala 1:3500000
Sistema de Coordenadas: UTM
Datum: SIRGAS 2000 Folha 24S
Elaboração: Rodrigus Oliveira Feitosa, 2021

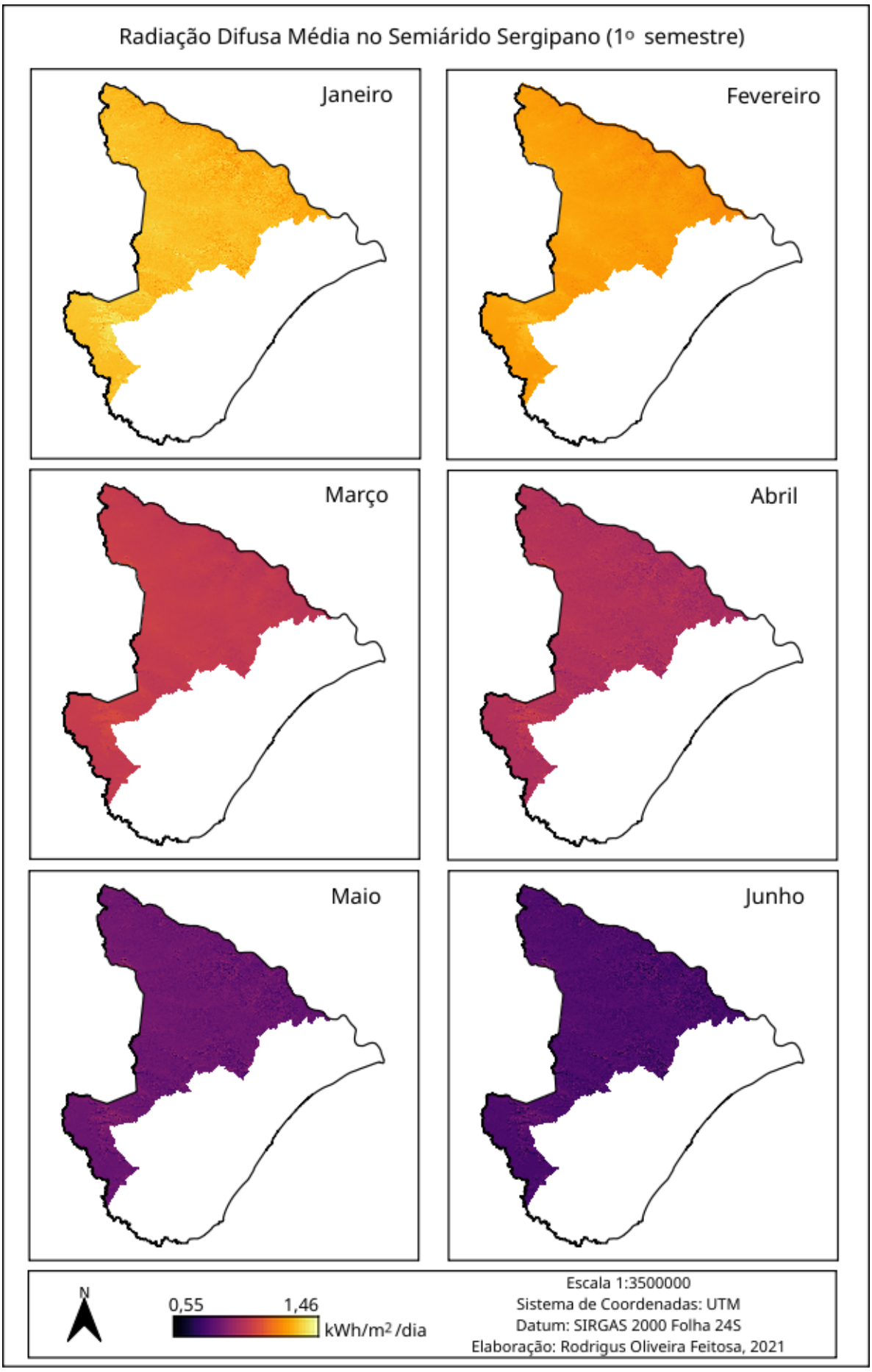

Radiação Direta Média no Semiárido Sergipano (2º semestre)
Julho
Agosto
Setembro
Outubro
Novembro
Dezembro
N
3,00
7,65
kWh/m² /dia
Escala 1:3500000
Sistema de Coordenadas: UTM
Datum: SIRGAS 2000 Folha 24S
Elaboração: Rodrigus Oliveira Feitosa, 2021

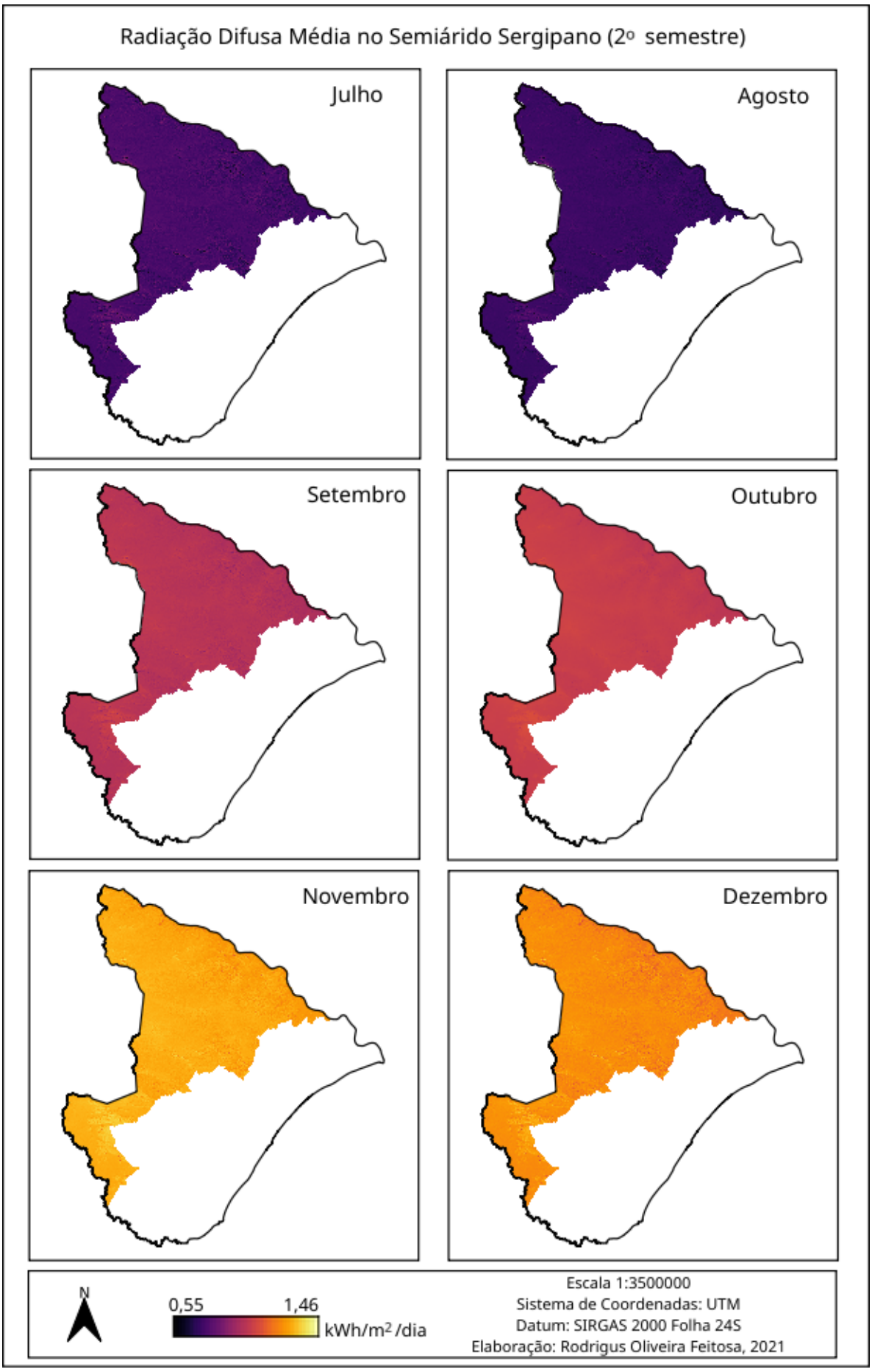
APÊNDICE C – Dados de Radiação Solar Difusa para o Céu Claro





Fonte: Elaborado pelo autor, 2020


Radiação Difusa Média no Semiárido Sergipano (1º semestre)
Janeiro
Fevereiro
Março
Abril
Maio
Junho
N
0,55
1,46
kWh/m² /dia
Escala 1:3500000
Sistema de Coordenadas: UTM
Datum: SIRGAS 2000 Folha 24S
Elaboração: Rodrigus Oliveira Feitosa, 2021


Radiação Difusa Média no Semiárido Sergipano (2º semestre)
Julho
Agosto
Setembro
Outubro
Novembro
Dezembro
N
0,55
1,46
kWh/m² /dia
Escala 1:3500000
Sistema de Coordenadas: UTM
Datum: SIRGAS 2000 Folha 24S
Elaboração: Rodrigus Oliveira Feitosa, 2021